

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

**Studium vlivu vysokovýkonného laseru na optická konvenční
vlákna**

**Studying the influence of high power laser on conventional optical
fibers**

2015/2016

Ondrej Čech

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání bakalářské práce

Student:

Ondrej Čech

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601R013 Telekomunikační technika

Téma:

Studium vlivu vysokovýkonného laseru na optická konvenční vlákna
Studying the Influence of High Power Laser on Conventional Optical
Fibers

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Studium a popis vlastností optických vláken, vláknových laserů a zesilovačů.
2. Návrh měřicího pracoviště pro měření vlivu vysokovýkonného laseru na optická konvenční vlákna.
3. Měření změny výkonové úrovně v důsledku změny délky optického vlákna při působení záření o velkém výkonu.
4. Měření závislosti mezi vysokým výkonem záření a profilem svazku při různých délkách optického vlákna.
5. Statistické vyhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Lopez-Higuera, J. M. (2002). Handbook of Optical Fibre Sensing Technology (1st Edition ed.). Cantabria, Spain: Wiley, John & Sons, Incorporated.
- [2] DERIKSON, Dennis. Fiber Optic Test and Measurement. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1998, 795 p. ISBN 01-353-4330-5.
- [3] BOTTACCHI, Stefano. Noise and signal interference in optical fiber transmission systems: an optimum design approach. Chichester, UK: John Wiley, 2008, 831 p. ISBN 04-700-6061-1.
- [4] DESURVIRE, Emmanuel. Erbium-doped fiber amplifiers: device and system developments. New York: J. Wiley, 2002, 763 p. ISBN 04-714-1903-6.
- [5] BJARKLEV, Anders. Optical fiber amplifiers: design and system applications. Boston: Artech House, 1993, 392 p. ISBN 08-900-6659-0.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Radek Pobořil**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 29.04.2016



doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: *25. dubna 2016*



.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych věnoval poděkování panu Ing. Radkovi Pobořilovi za podporu a cenné rady při vypracování mé bakalářské práce.

Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Lukášovi Hájkovi, za pomoc při práci v nepřítomnosti mého vedoucího.

V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině, přátelům a všem, kteří mi byli oporou a pomohli mi tuto práci dokončit. Zvláštní poděkování patří Bc. Karlovi Drahošovi, Ing. Jakubovi Čubíkovi, Janu Chavíkovi, Kamile Vavřáčové a Markétě Pivoňkové.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá všeobecnými poznatky o optických vláknech, laserech a optických zesilovačích. První část práce je věnována studiu těchto témat. Hlavním cílem práce je však návrh měřicího pracoviště pro měření stárnutí optických vláken a jejich následné experimentální měření. V práci jsou dále popsány použité měřicí metody měření útlumu na optických vláknech různých délek a různé doby zatěžování vysokovýkonným laserem, popis použitého vysokovýkonného laseru a vyhodnocení naměřených výsledků.

Klíčová slova

Optická vlákna, vysokovýkonný laser, EDFA zesilovače, stárnutí optických vláken

Abstract

Bachelor thesis deals with general knowledge about optical fibers, lasers and optical amplifiers. The first part is attended to study of these topics. However, the main object of the work is to design measuring workplace for measuring the aging of optical fibers and their subsequent experimental measurements. Thesis further describes the used measurement methods for measuring attenuation of optical fibres of different lengths and different duration of loading by high power laser, a description of high power laser and the evaluation of the measured results.

Key words

Optical fibers, high power laser, EDFA amplifiers, aging of optical fibers

Seznam použitých zkratk a symbolů

Symbol	Význam symbolu	Jednotky
a	Měrný útlum	[dB/km]
A	Útlum	[dB]
α_m	Mezní úhel	[°]
α_r	Koeficient ohybových ztrát	[-]
DSF	Dispersion shifted fiber	
DWDM	Dense wavelength division multiplex	
EDFA	Erbium doped fibre amplifier	
ITU-T	International Telecommunication Union	
l	Délka trasy	[km]
LD	Laserová dioda	
n_1	Index lomu jádra	[-]
n_2	Index lomu pláště	[-]
Nd:YAG	Neodymium-doped yttrium aluminium garnet	
NDSF	Non-dispersion shifted fiber	
NZD+	Non-zero dispesion+	
NZD-	Non-zero dispesion-	
NZDF	Non-zero dispersion fiber	
P_{in}	Vstupní výkon	[mW]
P_{out}	Výstupní výkon	[mW]
R	Poloměr zakřivení	
SOA	Semiconductor optical amplifier	
WDM	Wavelength division multiplex	

Obsah

Úvod.....	- 1 -
1 Optická vlákna.....	- 2 -
1.1 Popis optického vlákna	- 2 -
1.1.1 Jádru a plášť	- 3 -
1.2 Základní typy optických vláken	- 3 -
1.2.1 Jednovidová vlákna se skokovým indexem lomu	- 3 -
1.2.2 Mnohovidová vlákna se skokovým indexem lomu	- 4 -
1.2.3 Mnohovidová vlákna se spojitým indexem lomu	- 4 -
1.3 Útlum optických vláken	- 5 -
1.3.1 Absorpce.....	- 5 -
1.3.2 Rozptyl	- 6 -
1.3.3 Ohybové ztráty	- 6 -
1.4 Typy vláken pro telekomunikace	- 6 -
2 Lasery.....	- 8 -
2.1 Popis laseru	- 8 -
2.1.1 Základní konstrukce laseru.....	- 8 -
2.1.2 Princip fungování laseru.....	- 9 -
2.2 Emisní charakteristiky.....	- 10 -
2.3 Použití laserů.....	- 11 -
3 Zesilovače	- 12 -
3.1 Rozdělení zesilovačů.....	- 12 -
3.1.1 Ramanovské zesilovače.....	- 12 -
3.1.2 Polovodičové (SOA - semiconductor optical amplifier) zesilovače.....	- 12 -
3.1.3 Vláknové zesilovače s dopovaným vláknem.....	- 13 -
3.2 EDFA zesilovače.....	- 13 -
3.2.1 Energetické hladiny Er^{3+}	- 13 -
3.2.2 Základní konfigurace EDFA	- 14 -
3.2.3 Výhody EDFA zesilovačů	- 14 -
4 Návrh a konstrukce měřicího pracoviště	- 15 -
4.1 První stupeň - vláknový laser s erbiem dopovaným vláknem.....	- 15 -
4.2 Druhý a třetí stupeň – EDFA zesilovač.....	- 16 -

5	Měření změn vlastností optických vláken v závislosti na aplikaci vysokého výkonu a změny jejich délky	- 24 -
5.1	Měření metodou vložných ztrát	- 24 -
5.2	Měření útlumu v reálném čase	- 27 -
6	Měření profilu svazku	- 50 -
	Závěr	- 53 -
	Použitá literatura	- 54 -
	Seznam příloh.....	LV

Úvod

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo zjistit, jaký vliv má záření o vysokém výkonu na běžně používané typy vláken. Bylo tedy nutné provést experimentální měření. K tomu bylo potřebné nejdříve navrhnout měřicí pracoviště, vybrat vhodnou metodu pro měření a následně statisticky vyhodnotit naměřené výsledky.

V prvních třech kapitolách práce se budeme zabývat teoretickou částí. V první kapitole se si řekneme něco o optických vláknech, jejich popisu, rozdělení a běžně používaných typech. Druhá kapitola bude řešit konstrukci laseru, princip jeho fungování a praktické použití. Poslední pasáž teoretické části nám přiblíží typy zesilovačů, a bližší popis EDFA zesilovačů, které jsou pak použité v praktické části této práce.

V praktické části práce bude popsán návrh měřicího pracoviště, typ a popis použitého vysokovýkonného laseru a jeho součástí. Budou zde popsány postupy měření, metody měření a důvody jejich použití. Dále zde budou graficky a tabulkově předloženy výsledky měření stárnutí optických vláken a jejich statistické vyhodnocení.

1 Optická vlákna

V dnešní době jsou téměř všechny moderní informační a komunikační technologie závislé na optických vláknech. Jsou totiž základním přenosovým médiem. Počátky optických komunikací zasahují až do konce 18. století.

První demonstrováné pokusy v oblasti optiky a vedení světla byli provedeny až v polovině 19. století. Jeden z těchto pokusů provedl anglický fyzik John Tyndall v roce 1870. Demonstroval vedení světla v zakřiveném tryskajícím proudu vody. Nicméně první skutečná optická vlákna začala vznikat až o sto let později, kdy americká firma Corning Glass vyrobila několik metrů optického vlákna s útlumem 20 dB/km, které vzniklo dopováním křemenného skla titanem. O několik let později už dokázali vyrobit vlákno s útlumem 4 dB/km, jehož jádro dopovali germániem, které se i dodnes používá u většiny vláken.

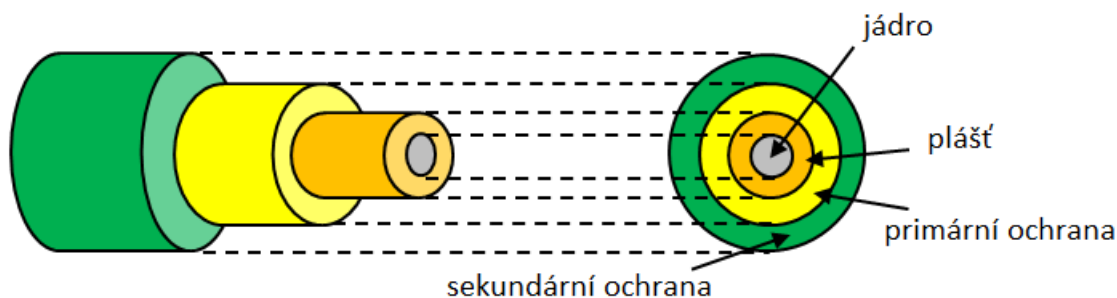
Tyto hodnoty jsou dnes u optických vláken minulostí. Útlumy se dostaly na úroveň pod 0,2 dB/km, mají téměř nulovou disperzi a dokáží překlenout vzdálenost stovky kilometrů.

1.1 Popis optického vlákna

Optické vlákno je dielektrická válcová symetrická struktura z křemenného skla nebo plastu. Může fungovat jako vlnovod nebo světlovod k přenosu světla mezi dvěma konci vlákna, které se šíří pomocí totálního odrazu.

Optická vlákna jsou široce používána v optických komunikacích, kde umožňují přenos signálu na delší vzdálenosti s vyšší rychlostí než běžné metalické vodiče. Vlákná se používají namísto metalických vodičů především proto, že mají menší ztrátovost a taky jsou imunní vůči elektromagnetickému rušení.

Optické vlákno se skládá z transparentního jádra s indexem lomu n_1 , které je obklopené pláštěm s indexem lomu n_2 , primární ochranou a sekundární ochranou. Průřez vláknem je znázorněn na obrázku 1.1. Nutnou podmínkou je, aby index lomu jádra byl větší než index lomu pláště. Světlo se ve vlákne šíří principem totálního odrazu, který zajistí, že se 100 % odraženého světla vrátí zpět do původního prostředí. Aby k tomu došlo, musí být mezní úhel menší, než úhel dopadu. Pokud je úhel příliš malý, dojde k průchodu světla do pláště. Toto světlo se vyváže s optického vlákna a přicházíme o část výkonu. [1] [2]



Obrázek 1.1: Průřez optickým vláknem [3]

1.1.1 Jádru a plášť

Jádru je válcová tyč z dielektrického materiálu (vede signál bez elektřiny). Světlo se šíří hlavně jádrem vlákna, které se vyznačuje průměrem nebo velikostí průřezové plochy. Ve většině případů by měl být průřez kruhový. Také se můžeme setkat i s dvojlovnými typy průřezů, které mohou být eliptického tvaru. Průměr jádra se obvykle pohybuje mezi 9 - 62,5 μm . Světlo se v jádru šíří a odráží od rozhraní jádra a pláště tak dlouho, dokud úhel mezi paprskem a rozhraním je menší než mezní úhel.

$$\alpha_m = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) [^\circ] \quad (1.1)$$

Jádru je obklopené pláštěm s nižším indexem lomu. Ten je také vyroben z dielektrického materiálu a spolu s jádrem má průměr 125 μm . Plní funkce, jakými jsou snížení ztráty světla z jádra do okolního prostředí, snižuje ztráty rozptylem na povrchu jádra, chrání vlákno před povrchovými nečistotami, přidává mu mechanickou pevnost a hlavně tvoří plochu pro odraz světla. [2]

1.2 Základní typy optických vláken

V této podkapitole se blíže seznámíme se třemi základními typy vláken, které jsou následující:

- a) Jednovidová vlákna se skokovým (stupňovitým) indexem lomu
- b) Mnohovidová vlákna se skokovým (stupňovitým) indexem lomu
- c) Mnohovidová vlákna se spojitým (gradientním) indexem lomu

1.2.1 Jednovidová vlákna se skokovým indexem lomu

Jednovidová vlákna jsou jedna z nejpoužívanějších typů vláken, zejména proto, že se u nich nevyskytuje módová disperze. Jednovidová vlákna se také vyznačují malým útlumem a velmi nízkou disperzí. Nejlépe se uplatní pro velké vzdálenosti, až 100 km bez opakovače. Díky tomu může být přeneseno více informací za jednotku času. Jednovidová vlákna jsou obecně charakterizována jako vlákna, se skokovým indexem lomu, což znamená, že index lomu jádra je vyšší než index lomu pláště.

Jednovidová vlákna mají i své nevýhody. Menší průměr jádra zapříčiňuje, že se světlo do jádra navazuje mnohem obtížněji. Kvůli vysokým nárokům na výrobu jsou také dražší, než mnohovidová vlákna. Jednovidová vlákna se vyvíjí již několik desetiletí. V důsledku toho existují tři základní jednovidová vlákna používané v moderních telekomunikačních systémech.

Nejstarším a nejrozšířenějším typem je vlákno bez posunu disperze (NDSF - Non-dispersion shifted fiber). Tato vlákna byla původně určena pro použití na vlnové délce 1310 nm s nulovou disperzí. Později byly používány také pro vlnovou délku 1550 nm, ale to bylo z důvodu vysoké disperze nežádoucí.

Tento nedostatek byl vyřešen dalším typem vlákna, kterým bylo vlákno s posunutou disperzí (DSF - Dispersion shifted fibre). Bylo navrženo tak aby pro oblast vlnové délky 1550 nm mělo nulovou disperzi. O několik let později se však zjistilo, že zatímco DSF pracovalo velmi dobře s jednou vlnovou délkou na 1550 nm, vykazovalo závažné nelineární jevy pro více vlnových délek

na 1550 nm. Z tohoto důvodu se ukázala hodnota nulové disperze nevýhodná pro přenos u DWDM (Dense wavelength division multiplex) systémů.

Poslední typ vlákna měl vyřešit problémy s nelineárními jevy, které se projeví u vlákna s posunutou disperzí. Vlákna s nenulovou disperzí (NZDF - Non-zero dispersion fibre) jsou k dispozici ve dvou verzích, a to NZD+ (Non zero dispersion +) a NZD- (Non zero dispersion -), kterých hodnoty nulové disperze klesají pod a nad vlnovou délku 1550 nm. Z důvodu nulového bodu disperze NZDF byli čtyřvlonné směšování a jiné nelineární efekty minimalizovány.

V každém případě jsou jednovidová vlákna dražší než mnohovidová, lze je ovšem použít pro přenosy na delší vzdálenosti, což je jejich výhoda oproti vláknům mnohovidovým. Pro své buzení však již vyžadují laserové diody. [1] [4]

1.2.2 Mnohovidová vlákna se skokovým indexem lomu

Mnohovidová vlákna se skokovým indexem lomu se vyznačují jednoduchou výrobou a manipulací. Tento typ vlákna v porovnání s jednovidovými vlákny má větší průměr jádra, což umožňuje použití více různých módů. Zároveň se do nich navazuje světlo jednodušeji než do jednovidových vláken. Mezi další výhody určitě patří relativně nízká cena, velká numerická apertura a možnost buzení luminiscenční diodou.

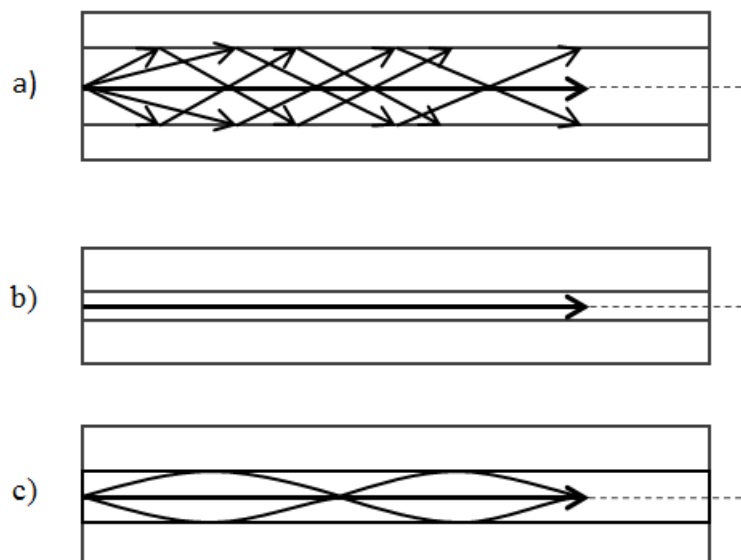
Nevýhodou je však větší útlum, disperze a malá přenosová kapacita při větších vzdálenostech. Je-li průměr jádra vlákna dostatečně velký (50 - 62,5 μm) a mění-li se skokem, jde o vlákno, které je schopné vést více různých vln světelných paprsků, tzv. módy.

Tímto vláknem se mohou šířit tři různé druhy světelných vln. První typ paprsku se pohybuje přímo středem jádra. Druhý typ se pohybuje ve strmém úhlu, odrazí se a šíří se dále pomocí totálního odrazu. Poslední typ překračuje mezní úhel a láme se do pláště. Z toho vyplývá, že každý paprsek překoná jinou vzdálenost. Tento rozdíl mezi překonáním vzdáleností v různých časech je jev známý jako disperze. [1] [4]

1.2.3 Mnohovidová vlákna se spojitým indexem lomu

Částečného potlačení módové disperze lze docílit použitím vláken se spojitým (gradientním) profilem indexu lomu. Toto vlákno je tvořeno tisíci tenkými vrstvami s různými indexy lomu. Jednotlivé vrstvy jsou v sobě rozpuštěny a kvůli tomu nelze přesně nalézt rozhraní mezi jádrem a pláštěm. Index lomu jádra v gradientním vlákně není konstantní, ale klesá se vzdáleností od osy vlákna postupně od n_1 po n_2 . Na šíření světla v těchto vláknech je použita metoda nepřetržitého lomu světla.

Paprsek světla má tvar sinusové křivky, díky čemuž se snižuje vidová disperze. Tento typ vláken je vhodné nasadit pro vyšší přenosové rychlosti, takže se používají především v datových sítích. [4]



Obrázek 1.2: Druhy optických vláken: a) mnohavidové; b) jednovidové; c) gradientní

1.3 Útlum optických vláken

Útlum optického vlákna je rozdíl přenášeného výkonu světla z jednoho konce vedení oproti druhému konci vedení. Čím nižší útlum optické vlákno má, tím bude přenos kvalitnější a přesnější. Útlum optického vlákna lze vypočítat jako logaritmus poměru vstupního výkonu P_{in} k výstupnímu výkonu P_{out} vyjádřený v decibelech.

$$A = 10 \cdot \log \frac{P_{in}}{P_{out}} [dB] \quad (1.2)$$

Dále se taky používá měrný útlum optického vlákna, který popisuje ztráty optického vlákna na jednotku délky. Vyjádříme ho pomocí vzorce:

$$\alpha = \frac{A}{l} [dB/km], \quad (1.3)$$

kde A je celkový útlum optického vlákna a l jednotka délky. [5]

1.3.1 Absorpce

Absorpce vzniká při interakci fotonu s atomární strukturou, přičemž vznikají formy energie, jakými jsou teplo nebo vibrace. Základní příčinou vzniku absorpce je přítomnost iontů kovů a vody ve skle. Absorpci dělíme na vlastní a nevlastní.

Do vlastní absorpce můžeme zařadit absorpci v infračervené oblasti, ultrafialové oblasti a absorpci vlastním materiálem SiO_2 , jenž jsou velmi malé. V ultrafialové oblasti je absorpce vyšší.

Způsobuje ji absorpce valenčními elektrony, co je z technologického hlediska zatím neodstranitelný problém. V infračervené oblasti ji způsobuje kmitání celých molekulových struktur a dá se s ní částečně manipulovat. Nevlastní absorpce jsou způsobeny OH ionty, které vytvářejí v optickém vlákně mikrotrhliny. [5]

1.3.2 Rozptyl

Rozptyl je jev, při kterém se směr šíření světla mění v důsledku interakce s částicemi, což způsobuje pokles přenášeného výkonu světla optickým vláknem. Dále sem lze zahrnout také nehomogenity indexu lomu a nečistoty v optickém vlákně. Známe několik základních druhů rozptylů.

Prvním druhem je Rayleighův rozptyl. Vzniká na mikročásticích menších, než je vlnová délka. Tento jev nelze odstranit, ale lze ho částečně eliminovat posunem pracovní frekvence do infračervené oblasti.

Dalším rozptylem je Mieův rozptyl, ke kterému dochází tehdy, pokud jsou nehomogenity srovnatelné s vlnovou délkou. Tento jev lze technologickými postupy při výrobě optického vlákna eliminovat.

Posledním základním druhem rozptylu je Ramanův rozptyl. Jedná se o změnu frekvence (vlnové délky) při průchodu systémem, způsobenou interakcí s vibračními a rotačními stavy systému. Mění se při něm energie fotonů rozptylujícího světla. Může dojít ke zvýšení energie rozptýleného fotonu (anti-Stokesova složka), ale častěji k jejímu snížení (Stokesova složka). Využívá se například ke změně vlnové délky záření v laserových systémech. [5]

1.3.3 Ohybové ztráty

Ohybové ztráty jsou způsobeny porušením podmínky totálního odrazu, co se nakonec projevuje vyvázáním světla z optického vlákna. Dělíme je na mikroohyby a makroohyby.

Mikroohyby jsou způsobeny nedokonalostí optického vlákna. Jedná se o deformace pláště v řádu milimetru a má zakřivení menší než je průměr jádra vlákna. Ohybové ztráty se dají vyjádřit pomocí koeficientu ohybových ztrát α_r , kde R je poloměr zakřivení.

$$\alpha_r = c_1(R) \cdot e^{-c_2(R) \cdot R} \quad (1.4)$$

Makroohyby jsou způsobeny ohybem samotného optického vlákna. Dochází k nim například při pokládání kabelů a projevují se především útlumem na vyšších vlnových délkách. Pokud dojde ve vlákně k úplné ztrátě energie (světlo se vyváže ven z vlákna), zavádí se pojem kritický poloměr zakřivení. [5]

1.4 Typy vláken pro telekomunikace

V telekomunikacích se používá mnoho různých druhů optických vláken. Zde budou uvedeny ty nejpoužívanější.

Konvenční jednovidové vlákno dle ITU-T G.652

Je určené původně pro přenos ve druhém přenosovém okně. Vyznačuje se přirozeným průběhem koeficientu chromatické disperze s nulou v těsném okolí 1310 nm.

Vlákno s posunutou disperzí dle ITU-T G.653

Je vláknem, u něhož je celková disperze posunuta tak, aby byl disperzní koeficient nulový v okolí 1510 nm. Vlákno je optimalizováno pro práci ve třetím okně.

Vlákno s minimalizovaným útlumem ve III. okně dle ITU-T G.654

Je vláknem specializované pro dálkové přenosy bez opakovacích prvků, zejména podmořské trasy. Snížení hodnoty měrného útlumu až na 0,18 dB/km se dosahuje vysokou čistotou materiálu jádra.

Vlákno s nenulovou posunutou disperzí dle ITU-T G.655

Je vláknem navrženým pro přenos ve třetím přenosovém okně a optimalizováno pro aplikace DWDM. Disperzní koeficient je posunut tak, aby neprocházel nulou, ale pohyboval se mezi minimální a maximální hodnotou. Omezení shora sleduje, aby celková disperze byla přijatelná i pro 10 Gbit/s přenosy, omezení zdola přispívá k redukci čtyřvlnného směšování. [6]

2 Lasery

Již v roce 1917 byla na základě termodynamických a statistických úvah předpovězena stimulovaná emise A. Einsteinem. O 11 let později tuto teorii potvrdili svým pozorováním R. Ladenburg a H. Kopfermann. V roce 1940 pak byla poprvé využita pro zesilování sovětským fyzikem W. A. Fabrikantem.

Později se přišlo na to, že když se spojí optické vlákno a laser, vznikne vláknový laser, velmi intenzivní zdroj kvalitního svazku záření. Byl navržen v roce 1960, kdy T. H. Maiman rozzářil koherentním světlem krystal rubínu a sestavil tak první laser.

Vláknové lasery začali postupně nahrazovat starší typy laserů. V současnosti existuje více jak 5000 různých typů laserů, které mají široké využití v medicíně, stavebnictví, informatice nebo v různé vojenské technice.

Roku 1962 byl současně na různých místech vyvinut polovodičový laser. V této kapitole se s problematikou laserů seznámíme blíže. Zaměříme se na jejich konstrukci, princip fungování, charakteristiky a využití v praxi.

2.1 Popis laseru

Laser je kvantový generátor a zesilovač koherentního optického záření, nejčastěji ve viditelné, ultrafialové nebo infračervené oblasti spektra, který funguje na principu stimulované emise záření aktivních částic buzených vnějším zdrojem energie. Při procesu stimulované emise má stimulovaný a emitovaný foton stejnou energii, stejný směr, polarizaci a fází. Z toho plynou tyto základní vlastnosti, kterými se laser odlišuje od jiných zdrojů záření:

- monochromaticnost - má jen jednu vlnovou délku;
- nízká divergence laserového svazku;
- koherentní - vysoká hustota přenášeného výkonu.

Žádné jiné záření, než záření generované laserem tyto vlastnosti nemá.

2.1.1 Základní konstrukce laseru

Laser je přístroj, který je zkonstruován na principech kvantové mechaniky. Generuje koherentní záření, které si díky svým vlastnostem našlo rozmanité množství aplikací.

Lasery jako takové je možné zkonstruovat mnoha různými způsoby. Mohou mít podobu miniaturní elektronické součástky, optického vlákna nebo komplikované chemické aparatury. Ačkoli existuje mnoho druhů laserů, každý v sobě musí zahrnovat tři součásti:

- rezonátor vytvářející zpětnou vazbu mezi zářením a aktivním prostředím;
- aktivní prostředí;
- zdroj čerpání pro excitaci aktivního prostředí.

Mezi další části může patřit ještě chlazení, elektrický zdroj a řídicí a kontrolní elektronika.

Základem každého laseru je však právě onen rezonátor sloužící k zesilování světla. Rezonátor se skládá ze dvou rovnoběžných zrcadel. Dle konfigurace laseru může být zrcadlo částečné propustné nebo nepropustné.

Jsou známé i lasery, které nepotřebují rezonátor, protože dokážou vyvinout dostatečně velkou energii při jednom průchodu aktivním prostředím. Mezi tyto lasery můžeme zařadit měděný laser nebo dusíkový laser.

Aktivní prostředí je oblast, která je silně dopovaná ionty vzácných prvků. Toto prostředí může být tvořeno pevnými látkami, kapalinami ale i směsí plynů.

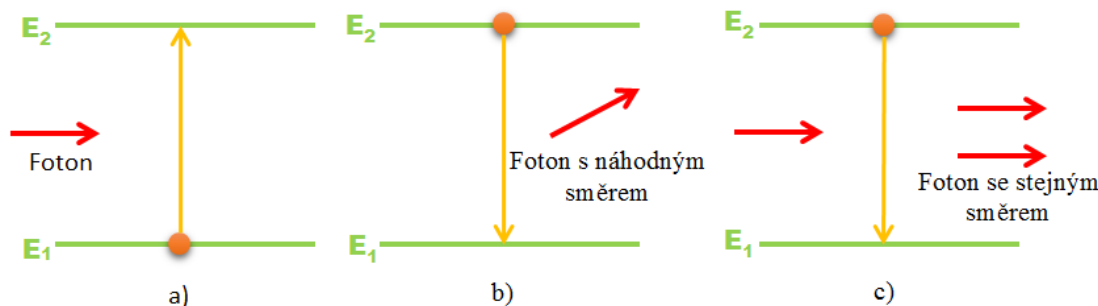
Zdroj čerpání se používá, jako dodávka energie pro dostatečnou excitaci elektronů do vyšší energetické hladiny. Může být ve formě optické, chemické, termické nebo elektrické energie. [7] [8]

2.1.2 Princip fungování laseru

Absorpce - podmínkou pro průběh absorpce světla je vyšší počet valenčních elektronů na nižší energetické hladině. Při tomto procesu elektron v nižším energetickém stavu pohltí foton odpovídající frekvence a excituje do vyššího stavu.

Spontánní emise - samovolný přechod z vyšší excitované hladiny do stavu s nižší energií, přičemž se vyzáří foton s různou fází, vlnovou délkou, polarizací a směrem. Jedná se o nekoherentní záření.

Stimulovaná emise - spočívá v tom, že dopadající foton vyvolá sestup elektronu z excitované hladiny do hladiny základní. Během tohoto sestupu se vyzáří foton o stejné vlnové délce, polarizaci a fází, jako foton, který stimulovanou emisi vyvolal. Jedná se o koherentní záření.

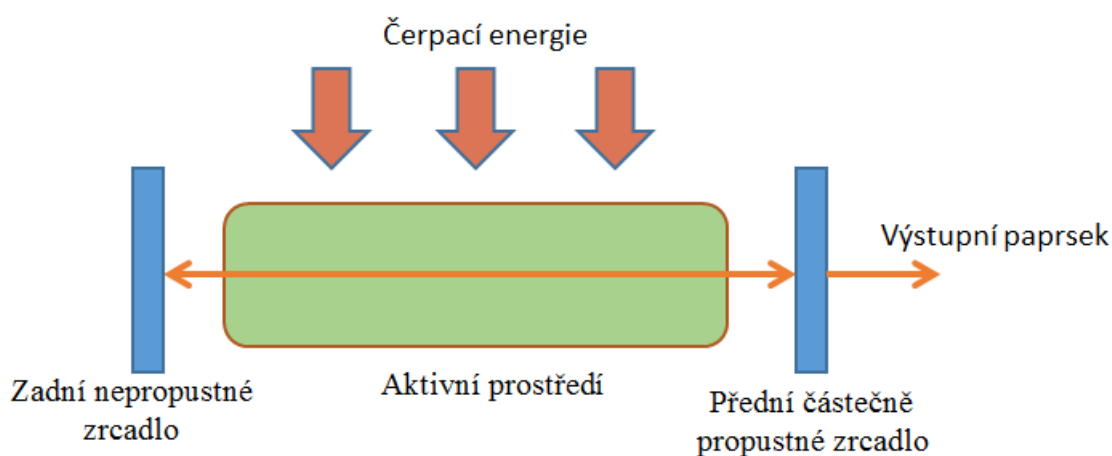


Obrázek 2.1: a) absorpce; b) spontánní emise; c) stimulovaná emise

Aby se dokázal vytvořit paprsek laseru, musí být splněna jedna z hlavních podmínek, kterou je aktivní prostředí. Pro funkčnost laseru musí mít aktivní prostředí tří nebo čtyř hladinový systém. Jedna z hladin je takzvaná metastabilní hladina. Tato hladina je potřebná k tomu, aby excitované elektrony neklesly na základní hladinu dřív, než jim je předána energie stimulovaným fotonem. Pokud by se metastabilní hladina v prostředí nenacházela, elektron by se na vyšší hladině neudržel, klesnul by na nižší hladinu a vyzářil by se foton pokračující v různém směru. Tomuto jevu se říká spontánní emise. V momentě, kdy stimulující foton předá energii elektronu na metastabilní hladině, vyzáří

se dva fotony o stejném směru, fázi, polarizaci a vlnové délce jako stimulující foton a elektron sestoupí na základní hladinu. Takto funguje proces stimulované emise.

Tímto způsobem se fotony hromadí a rezonují mezi dvěma zrcadly. Tyto dvě zrcadla dohromady tvoří rezonátor. Obě zrcadla jsou k sobě rovnoběžná. Pokud vezmeme v úvahu, že špatně letící fotony neustále zanikají a rovnoběžně letící fotony se udržují v aktivním prostředí a stimulují další fotony, zjistíme, že rovnoběžně letících fotonů je čím dál tím více. Množství fotonů tak bude exponenciálně narůstat. Pokud foton zesílí na určitou úroveň, částečně propustné zrcadlo ho propustí ven a vznikne požadovaný paprsek. [7]



Obrázek 2.2: Funkční schéma laseru

2.2 Emisní charakteristiky

Nutnou podmínkou pro funkčnost laseru je aktivní prostředí. Jako aktivní prostředí můžou být použité skla nebo krystaly, které mohou být dopované ionty různých chemických prvků, jakými jsou erbium, neodým, ytterbium, thulium, holmium, cerium a další. Právě ono zmíněné erbium je nejčastěji používaným chemickým prvkem pro vláknové lasery a zesilovače.

Erbium je měkký přechodný kov stříbřitě bílé barvy ze skupiny lanthanoidů. V periodické tabulce má protonové číslo 68. Jako Er^{3+} se vyskytuje pouze v sloučeninách a právě v této podobě je velmi vhodný pro použití v optických komunikacích. Důvod použití v telekomunikacích je právě jeho vlastnost fluorescence na vlnových délkách od 1530 do 1570 nm, obzvláště na vlnové délce 1550 nm, na které mají jednovidová optická vlákna nejmenší útlum.

Jako dopanty se však používají i jiné vzácné zeminy patřící mezi lanthanoidy, které jsou zmíněny výše. Každá se budí použitím světla na různých vlnových délkách. [7]

2.3 Použití laserů

Využití laserů je v současnosti obrovské. Můžeme se nimi setkat v medicíně, průmyslu, elektronice, výpočtové technice až po vojenskou technologii.

Jako první laser v medicíně byl použit rubínový laser k operaci oční sítnice. Kvůli úspěšnosti, byl dále taky vyzkoušen pro odstraňování různých skvrn na kůži a kožních nádorů. Postupně ho však nahradil Nd:YAG (neodymium-doped yttrium aluminium garnet) laser a CO_2 laser, díky kterým se staly operace očí rychlé a méně bolestivé. Kromě použití v oftalmologii a dermatologii se pak lasery začaly používat taky v plastické a estetické chirurgii, kardiovaskulární chirurgii, stomatologii, neurologii, urologii a v mnoha dalších medicínských oborech. Kromě toho se taky využívá v diagnostických zařízeních, jakými jsou například tomograf nebo oftalmoskop.

V průmyslu se můžeme setkat s lasery ve stavebnictví nebo strojírenství. Zde se využívají hlavně Nd:YAG laser a CO_2 laser, pro vrtání, řezání, gravírování, svařování a úpravy povrchů. Jeho výhodou v průmyslu je právě možnost opracování bez kontaktu s výrobkem.

V elektronice se používají zejména polovodičové laserové diody. Konkrétně na ně můžeme narazit u laserových tiskáren, přehrávačů, různých senzorů nebo i čteček čárových kódů.

Dále se lasery využívají ve vojenské technice v podobě moderních zbraní a jako obranné technologie. V meteorologii se používají pro měření částic v ovzduší a v astronomii a geodézii jako radary pro měření vzdáleností.

3 Zesilovače

V optických komunikacích dochází na každé optické trase k zeslabování signálu a tím i ke ztrátě výkonu při přenosu. Pokles výkonu může být způsoben různými optickými komponenty, jako jsou optická vlákna, multiplexory, optické konektory, vazební členy a další. K opětovnému zesílení nebo obnovení signálu můžeme použít regenerátory nebo zesilovače. Původně se používaly regenerátory, které však převedly signál na elektrický a pak znovu převedly zesílený signál na optický. Jsou ale závislé na modulaci a použitém datovém formátu, zatímco zesilovače ne. Zesilovače nepřevádějí optický signál na elektrický, pouze zesilují amplitudu optického signálu. Jejich výhoda je hlavně v možnosti zesílit několik vlnových délek. Zesilují v optických oknech, při kterých dosahují optická vlákna nejnižší útlum na kilometr své délky.

V této kapitole se seznámíme se základními druhy zesilovačů a blíže si popíšeme EDFA zesilovače, které se využívají v praktické části této práce.

3.1 Rozdělení zesilovačů

K správnému fungování zesilovače je potřebné, aby mu byla dodávána energie. Tuto energii je možné dodávat v podobě optického čerpání. Podle toho můžeme rozdělit optické zesilovače na Ramanovské, polovodičové a vláknové zesilovače s dotací. V této podkapitole se budeme zabývat jejich základním principem, výhodami a nevýhodami.

3.1.1 Ramanovské zesilovače

Základním principem fungování Ramanovských zesilovačů je vytvoření stimulovaného Ramanova rozptylu v materiálu optického vlákna (viz kap. 1.3.2). Pomocí optického čerpání na určité vlnové délce lze dosáhnout interakce s fotony a fonony látky, při níž dochází k přičtení energie molekul látky k energii fotonů. Tím pak vzniká vid, který je u křemenných vláken posunut o 100 nm směrem k větším vlnovým délkám.

Výhodou Ramanovských zesilovačů je velký zisk a saturační výkon, nižší šum než u polovodičových a EDFA zesilovačů, existence Ramanova rozptylu v každém typu optického vlákna a také možnost pracovat na libovolné délce telekomunikačního pásma, pro které je optický materiál transparentní. Nevýhodou je ale nutnost použití výkonných pump. [9]

3.1.2 Polovodičové (SOA - semiconductor optical amplifier) zesilovače

Hlavním rozdílem mezi polovodičovými a vláknovými zesilovači je v použití polovodičové pumpy. Pomocí čerpání ale nedodáváme energii ve formě optické, ale elektrické ve formě elektrického proudu. Materiály vhodné pro konstrukci polovodičových zesilovačů mohou být GaAs, AlGaAs, InGaAs, InGaAsP, InAlGaAs nebo InP.

Výhodou jsou velmi malé rozměry, nízká spotřeba, cena a také nevyžadují optickou pumpu. Nevýhodou je menší zisk než u EDFA zesilovačů, velký vložný útlum, citlivost na polarizaci vstupního světla a také vyšší šum než u Ramanovských a EDFA zesilovačů. [9]

3.1.3 Vláknové zesilovače s dopovaným vláknem

Vláknové zesilovače s dopovaným vláknem využívají pro zesílení signálu optické vlákna dopované prvky vzácných zemin. Těmito prvky mohou být například erbium, thulium, praseodym, ytterbium, neodym a další. Energie v těchto zesilovačích je dodávána ve formě záření pomocí optické pumpy s konkrétní vlnovou délkou.

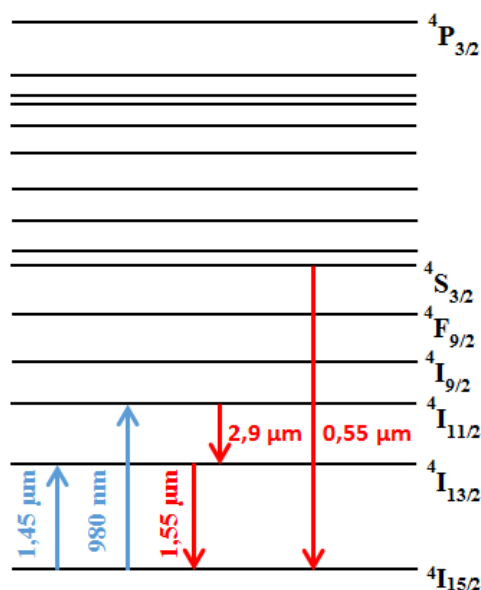
Hlavními výhodami použití je jejich jednoduchá realizace, vysoký zisk a široký rozsah vlnových délek. Nevýhodou jsou vysoké úrovně generovaného šumu. S tím souvisí i další nevýhoda, kterou je jejich použití jako předzesilovače pro obnovu velmi slabých signálů, protože v kritických případech by mohl mít šum stejnou úroveň jako úroveň signálu. [9]

3.2 EDFA zesilovače

EDFA zesilovače (erbium doped fibre amplifier) jsou zdaleka nejvýznamnější vláknové zesilovače současnosti. Mohou účinně zesílit světlo v oblasti vlnové délky 1550 nm, v kterých mají telekomunikační vlákna nejmenší ztráty. V této podkapitole se seznámíme s jejich energetickými hladinami, konfigurací, a také jejich výhodami.

3.2.1 Energetické hladiny Er^{3+}

EDFA zesilovač se skládá z optického vlákna, kterého jádro je dopované ionty erbia. Elektrony erbiem dopovaného vlákna mohou být buzeny na vyšší energetické hladiny čerpáním zdroje s kratšími vlnovými délkami světla. Zesílení probíhá jak v pásmu C (1530 - 1560 nm), tak i v pásmu L (1570 - 1610 nm), což dělá erbium vynikající volbou pro sestavení optických zesilovačů. K vybudení kvantové úrovně erbia se obvykle používají čerpadla pracující na vlnových délkách 980 nm nebo 1480 nm, což zabrání k vysokým ztrátám v optickém vlákně. Čerpadlo dodává energii do elektronů, která je vybudí na vyšší úroveň, jak je znázorněno na následujícím obrázku.



Obrázek 3.1: Struktura energetických úrovní Er^{3+}

Elektromagnetické pole může vybudit elektrony atomu v základním stavu na vyšší energetické hladiny. Tyto vyšší energetické hladiny jsou nestabilní a elektrony mají tendenci klesat zpět do základního stavu. V případě, že čas návratu elektronu do základního stavu z určité energetické hladiny je velmi dlouhý ve srovnání s dobou životnosti elektronu na předchozích hladinách, vytvoří se metastabilní hladina. Na této hladině se postupně hromadí elektrony. Pokud počet elektronů na metastabilní hladině převyšuje počet elektronů na základní hladině, mluvíme o inverzi populace. Ta je nezbytná k zesilování. Úroveň inverze populace je přímo úměrná množství dodávané energie. Příchozí fotony budou nyní stimulovat vzbuzené ionty, které se vrátí opět na základní hladinu, a vyžáří nový foton o stejné energii, vlnového vektoru a polarizaci jako původní foton. Tento proces se nazývá stimulovaná emise, a byl popsán v kapitole 2.1.2.

Nejlepší zesilovací charakteristiky dosáhneme v rozmezí vlnové délky od 1530 do 1560 nm, po kterých se bude zisk stále snižovat, dokud nedosáhne hodnoty 0 dB na vlnové délce 1616 nm. [5]

3.2.2 Základní konfigurace EDFA

Nejdůležitější součástí EDFA zesilovačů je dopované optické vlákno, ve kterém dochází k zesílení signálu. V kapitole 3.1.3 byly vyjmenovány příměsi, kterými toto vlákno může být dopováno. Každá z těchto příměsí má jiné vyzařovací charakteristiky. Díky tomu, že je mnoho různých příměsí, nejsme omezeni pouze na jejich použití v C nebo L pásmu jako v případě erbia, ale také se můžeme pohybovat i v O nebo S pásmu.

Další důležitou součástí zesilovače je laser, který slouží jako čerpadlo, a dodává energii do dopovaného vlákna. Používají se lasery pracující na vlnových délkách 980 nm a 1480 nm. V současnosti se více využívají lasery na vlnové délce 980 nm, díky kterým je možné dosáhnout vyššího stupně populační inverze, a tím docílit většího zisku zesilovače.

Mezi další části EDFA zesilovačů patří izolátory, pro prevenci Fresnelových odrazů a WDM děliče, kterých základním úkolem je sloučení původního paprsku s paprskem čerpadla do dopovaného vlákna. [5]

3.2.3 Výhody EDFA zesilovačů

EDFA zesilovače nabízejí hned několik výhod. Jsou použitelné v C a L pásmu, nabízejí vysoký zisk až kolem 30 - 50 dB, s nízkým šumovým číslem, přibližně 4 - 6 dB. Nepochybně největší výhodou je, že EDFA dokáže současně zesílit několik WDM (Wavelength division multiplex) signálů a jsou imunní vůči přeslechům.

4 Návrh a konstrukce měřicího pracoviště

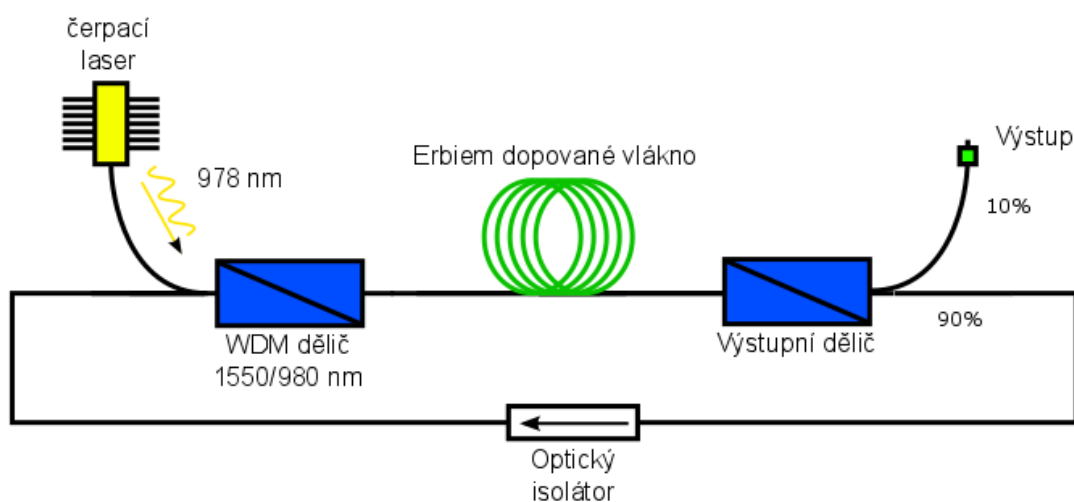
Cílem tohoto zapojení je vytvořit vláknový laser svítící na vlnové délce 1550 nm s co nejvyšším výstupním výkonem. Vzhledem k tomu, že vláknové lasery jsou poměrně drahou záležitostí, bylo jeho navrhnutí a následná konstrukce jasným krokem.

V následujících kapitolách bude postupně popsán návrh laseru společně s dvěma stupni tvořenými zesilovači EDFA.

4.1 První stupeň - vláknový laser s erbiem dopovaným vláknem

Prvním krokem k sestavení laseru bylo nutné zkonstruovat vláknový zesilovač s vláknem IsoGain I-6 (980/125) dopovaným erbiem od firmy FibreCore. U tohoto vlákna je zvýšená absorpce pro vysokou účinnost C pásma EDFA.

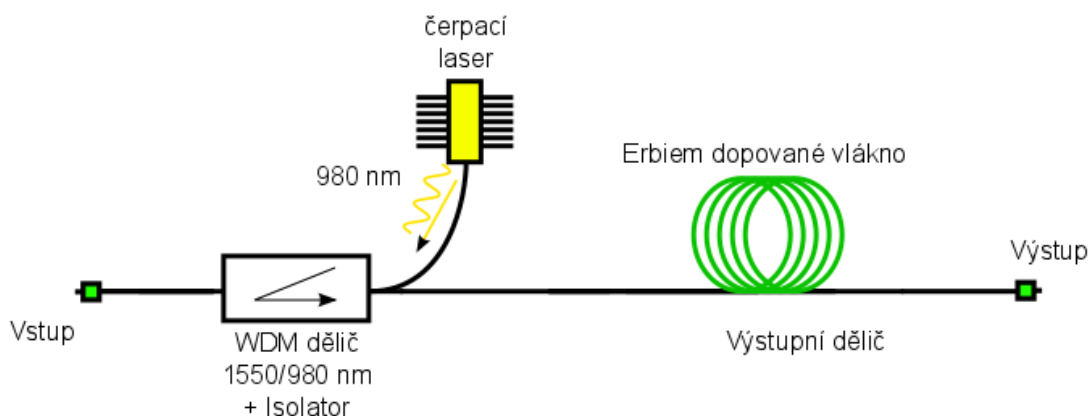
Ve vlákně dopovaném erbiem, bylo generováno světlo o vlnové délce 1550 nm a pomocí laserové diody o vlnové délce 978 nm do něj byla dodávána energie. Celkový dodaný světelný výkon tak dosáhl 600 mW. U schématu zapojení na obrázku 4.1 lze vidět, že skrz WDM dělič 1550/980 nm je dodáno čerpací světlo o vlnové délce 980 nm. Za ním následuje erbiem dopované vlákno o délce 6 metrů a k němu připojený výstupní dělič s poměrem 90% k 10%. 90% výstup je připojen na izolátor a dále na vstup WDM děliče 1550/980 nm díky čemu se vytvoří smyčka. Jedná se tedy o laser s kruhovým rezonátorem. 10% výstup slouží jako výstupní část prvního stupně, na který pak navazuje druhý stupeň, EDFA zesilovač, který bude popsán níže. Ideální délka vlákna byla simulována v softwaru od dodavatele vlákna. Výstupní dělič byl vybrán z různých dělicích poměrů pro dosažení maximálního výstupního výkonu, který v konečné fázi dosáhl 75,85 mW. Schéma zapojení prvního stupně je znázorněno na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1: Schéma prvního stupně laseru

4.2 Druhý a třetí stupeň – EDFA zesilovač

Pro druhý stupeň laseru, byl použit standartní EDFA zesilovač. Zde byl dodán světelný výkon o hodnotě 500 mW. Do WDM děliče 980/1550 nm s integrovaným izolátorem byla dodávána energie z čerpacího laseru o vlnové délce 980 nm. Z výstupu děliče bylo přiváděno světlo do erbiem dopovaného vlákna typu Liekki ER110-4/125. Z důvodu vysoké absorpce vlákna Liekki, 110 ± 10 dB/m, byla použita kratší délka vlákna, konkrétně 40 cm. Vláknem Liekki nám tím umožnilo posunout vlnovou délku z 1550 nm na 1559 nm. Integrovaný izolátor ve WDM děliči nám zamezil vrácení světla do čerpací a signálové cesty v nesprávném směru. Schéma zapojení EDFA zesilovače můžeme vidět na obrázku 4.2.

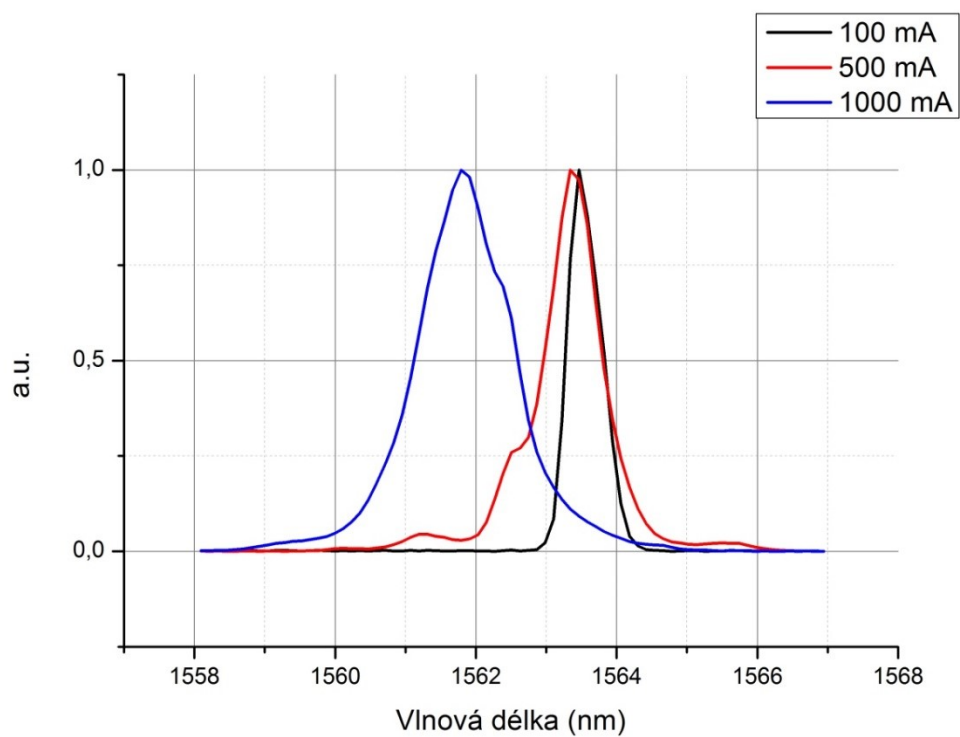


Obrázek 4.2: Schéma EDFA zesilovače

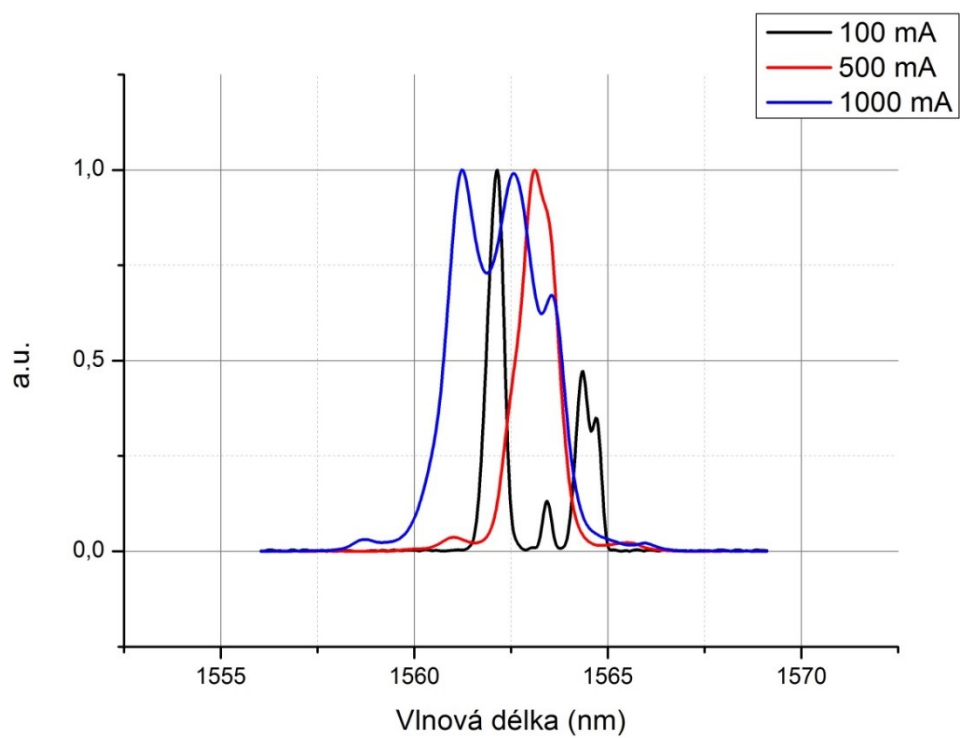
Pro třetí stupeň byl znovu použit EDFA zesilovač v stejném zapojení jako předchozí stupeň. Jedinou změnou byl typ použitého vlákna. Bylo použito opět vlákno jako u prvního stupně typu IsoGain I-6 (980/125) o délce 13 metrů.

Spektrum laseru

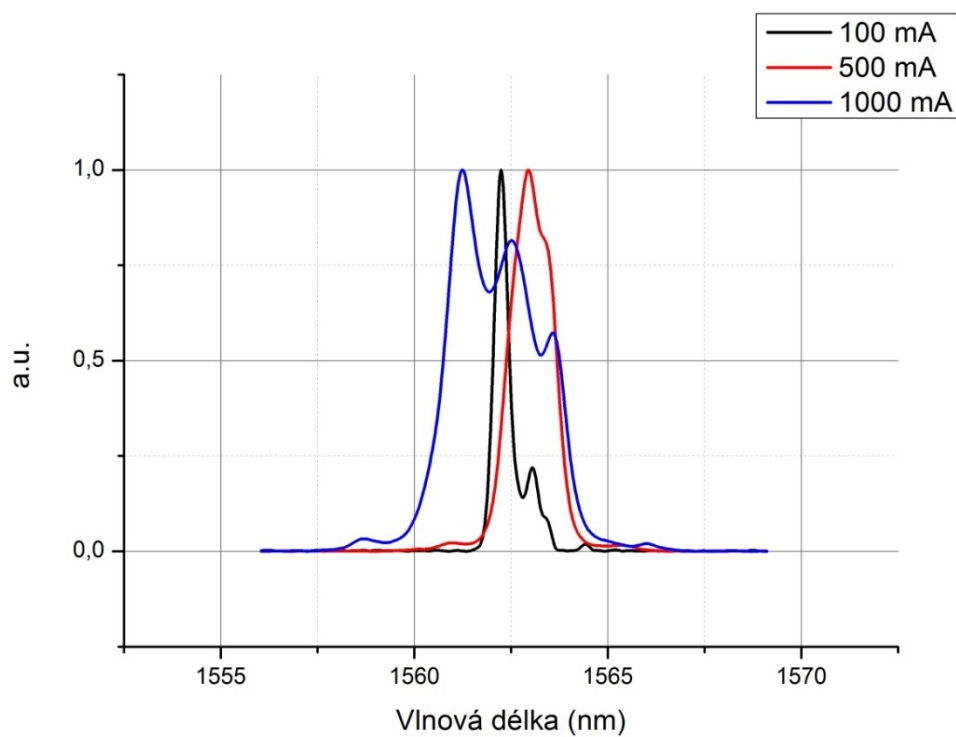
Součástí měření vlastností laseru bylo zjistit jeho spektrum při mnou předem vybraných nastavení proudů pro LD (laserovou diodu) a zesilovače. K měření byl použit spektrální analyzátor Thorlabs OSA 203 a software od výrobce Thorlabs OSA. Z důvodu velkého zpoždění spektrálního analyzátoru bylo nutné čekat k ustálení spektra a pak jej až vyhodnotit. Každý naměřený výsledek byl poté znormován od 0 k 1, aby se dali šířky spektra v grafech porovnávat. Na následujících obrázcích jsou naměřené a graficky znázorněné spektra laseru pro vybrané nastavení proudů. Všechny další grafy jsou v příloze A na CD.



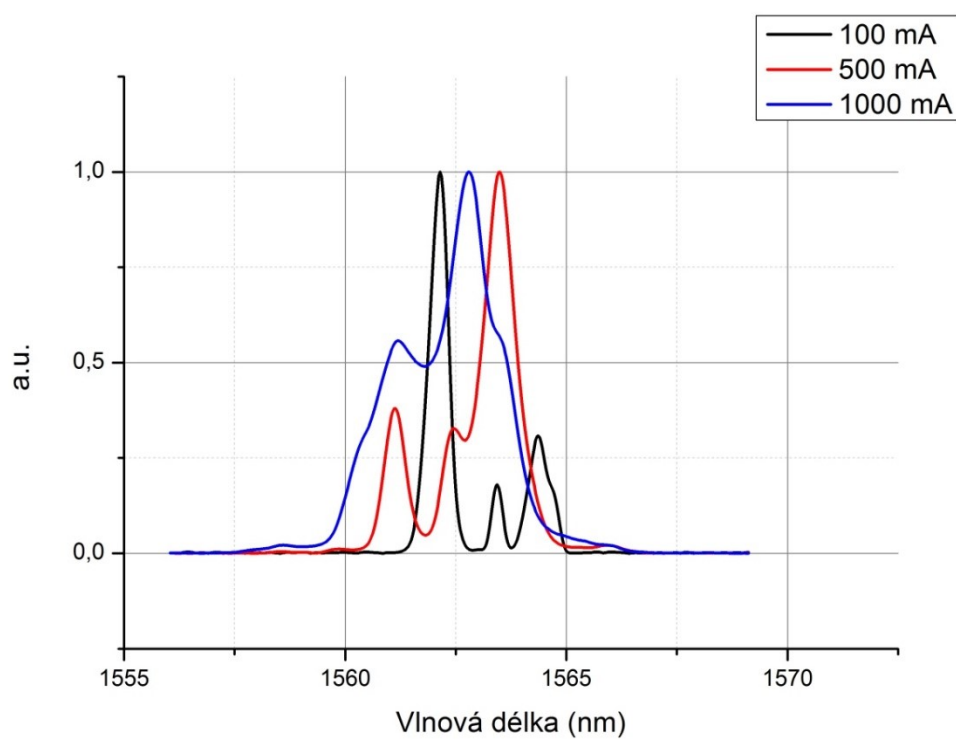
Obrázek 4.3: Spektrum laseru bez zapojeného zesilovače



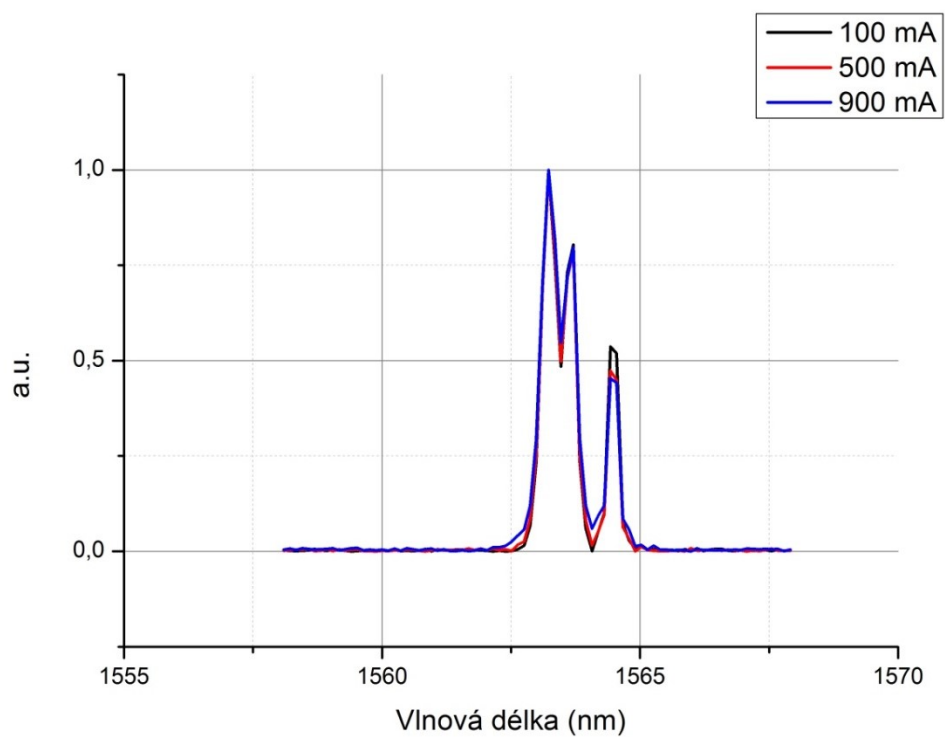
Obrázek 4.4: Spektrum laseru se zapojeným 1. zesilovačem při proudu 100 mA



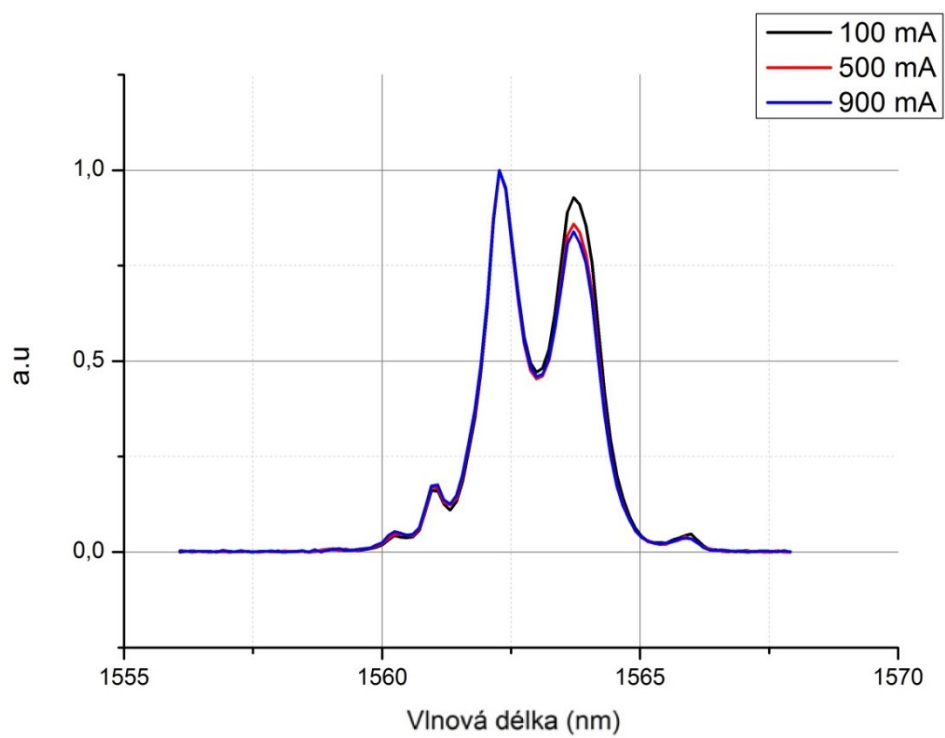
Obrázek 4.5: Spektrum laseru se zapojeným 1. zesilovačem při proudu 500 mA



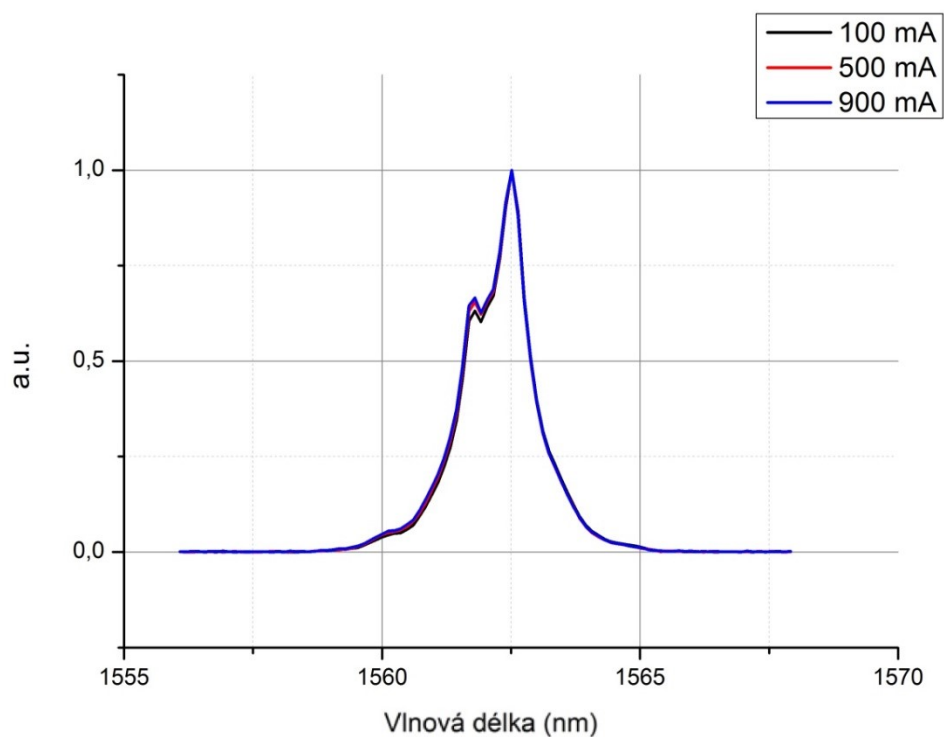
Obrázek 4.6: Spektrum laseru se zapojeným 1. zesilovačem při proudu 900 mA



Obrázek 4.7: Spektrum laseru při nastaveních 100 mA na LD a 100 mA na 1. zesilovači



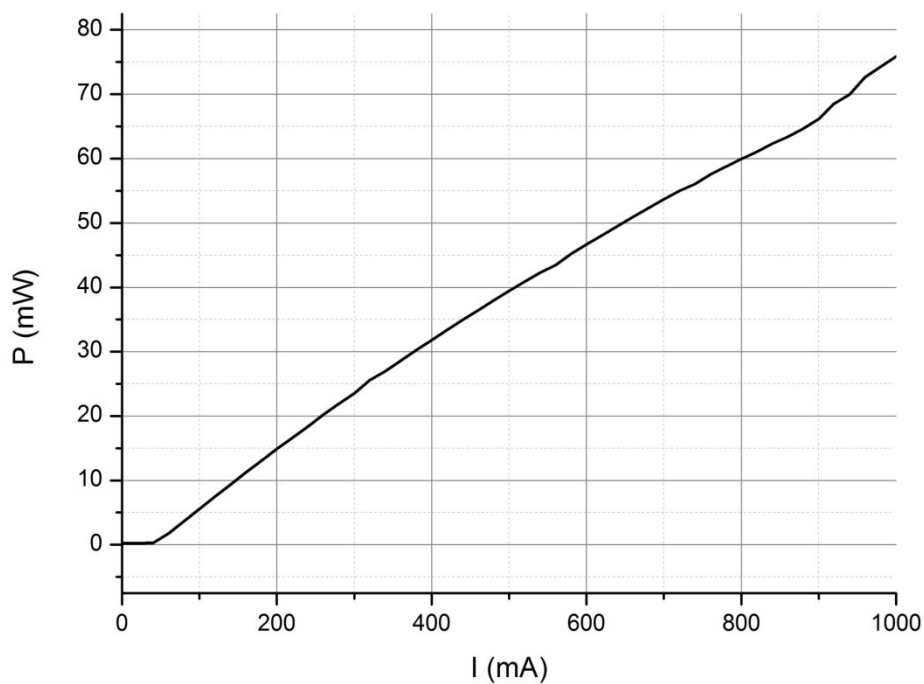
Obrázek 4.8: Spektrum laseru při nastaveních 500 mA na LD a 500 mA na 1. zesilovači



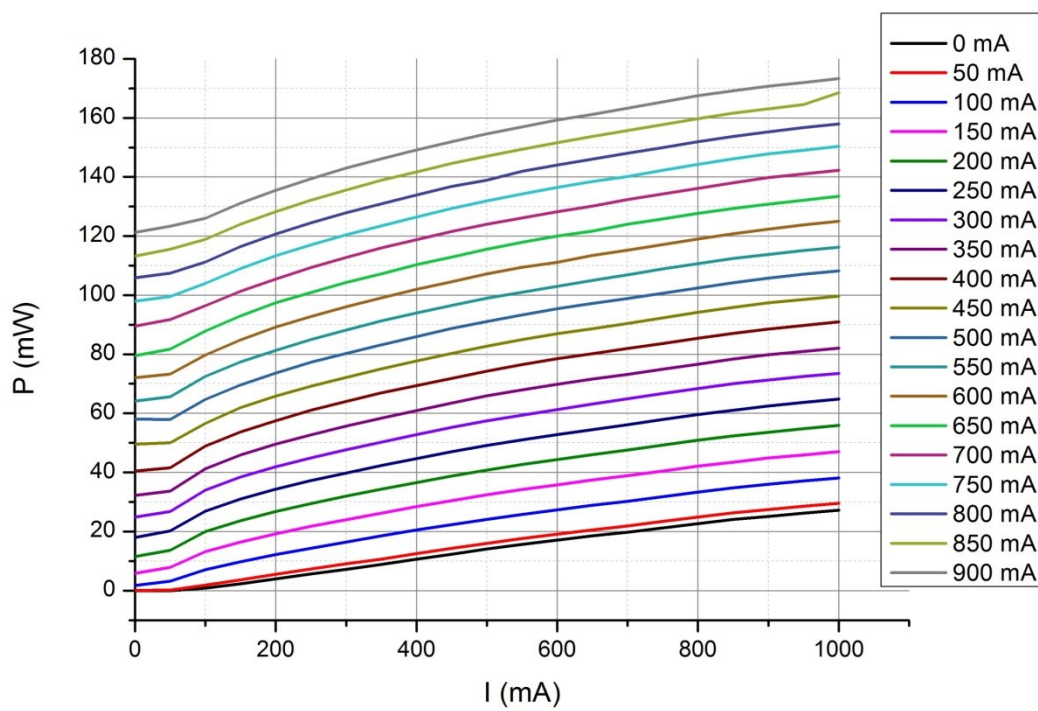
Obrázek 4.9: Spektrum laseru při nastaveních 1000 mA na LD a 900 mA na 1. zesilovači

Výkon laseru

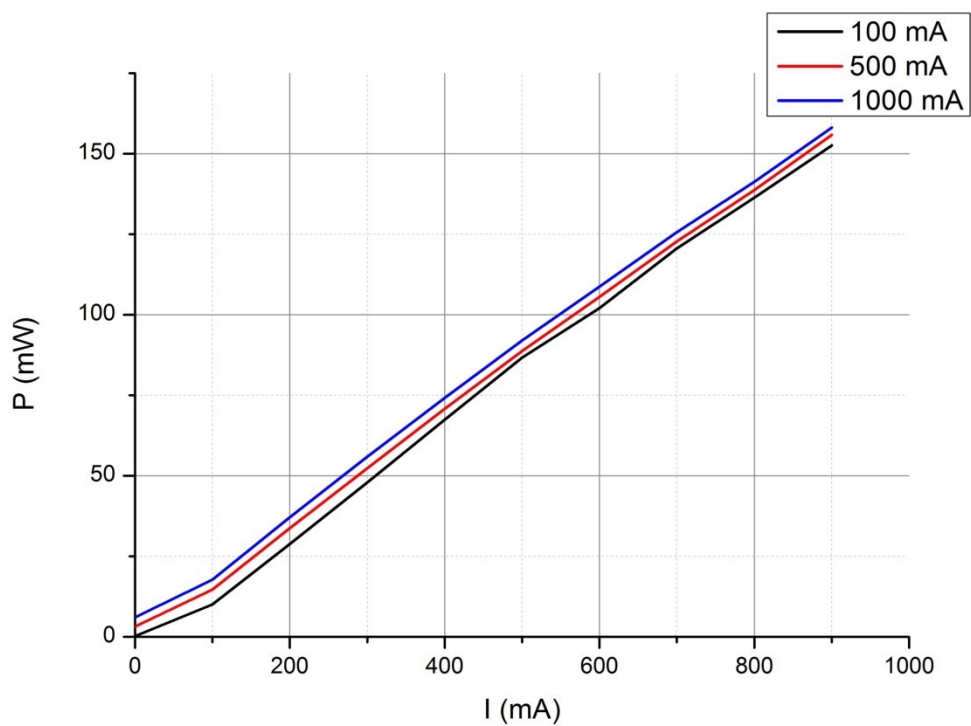
Pro měření výkonu laseru byli opět použité stejné nastavení proudů jako u měření spektra laseru. Měření bylo provedeno pro samotný vláknový laser, pro laser s připojeným jedním zesilovačem a pro laser s připojenými oběma zesilovači.



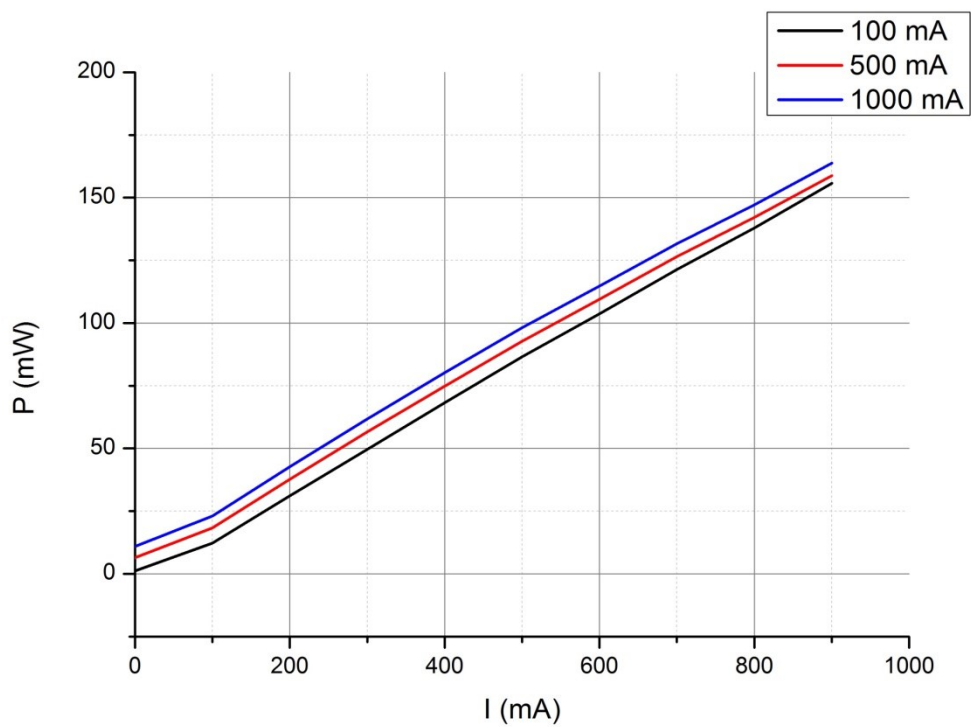
Obrázek 4.10: Výkon laseru bez zapojeného zesilovače



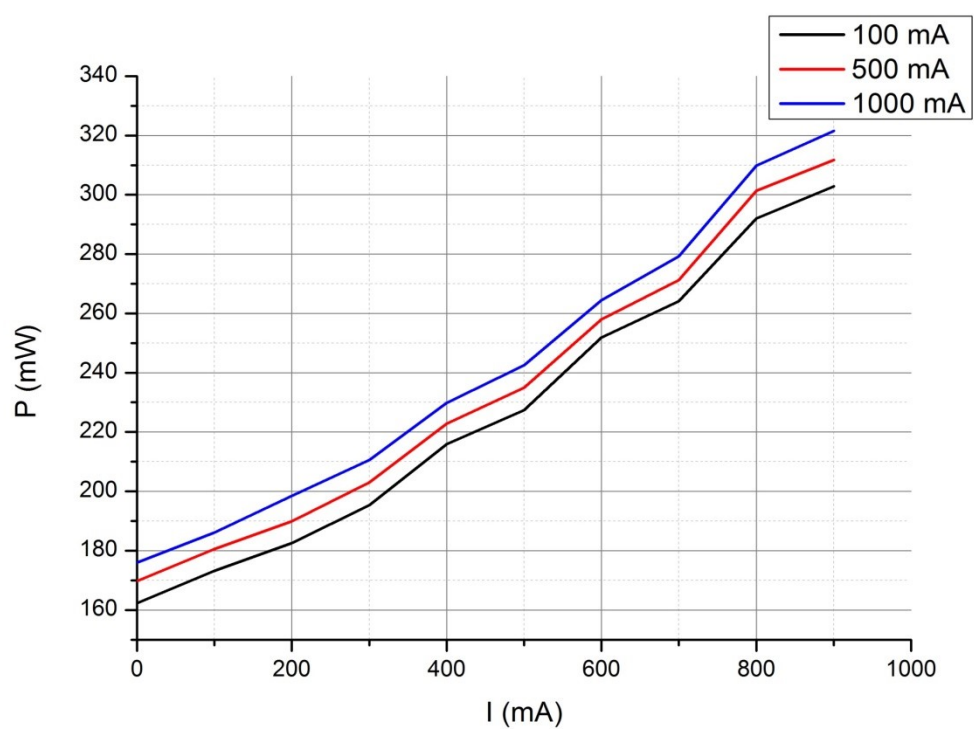
Obrázek 4.11: Výkon laseru se zapojeným 1. zesilovačem



Obrázek 4.12: Výkon laseru s oběma zesilovači pro nastavený proud 100 mA na LD



Obrázek 4.13: Výkon laseru s oběma zesilovači pro nastavený proud 500 mA na LD



Obrázek 4.14: Výkon laseru s oběma zesilovači pro nastavený proud 1000 mA na LD

5 Měření změn vlastností optických vláken v závislosti na aplikaci vysokého výkonu a změny jejich délky

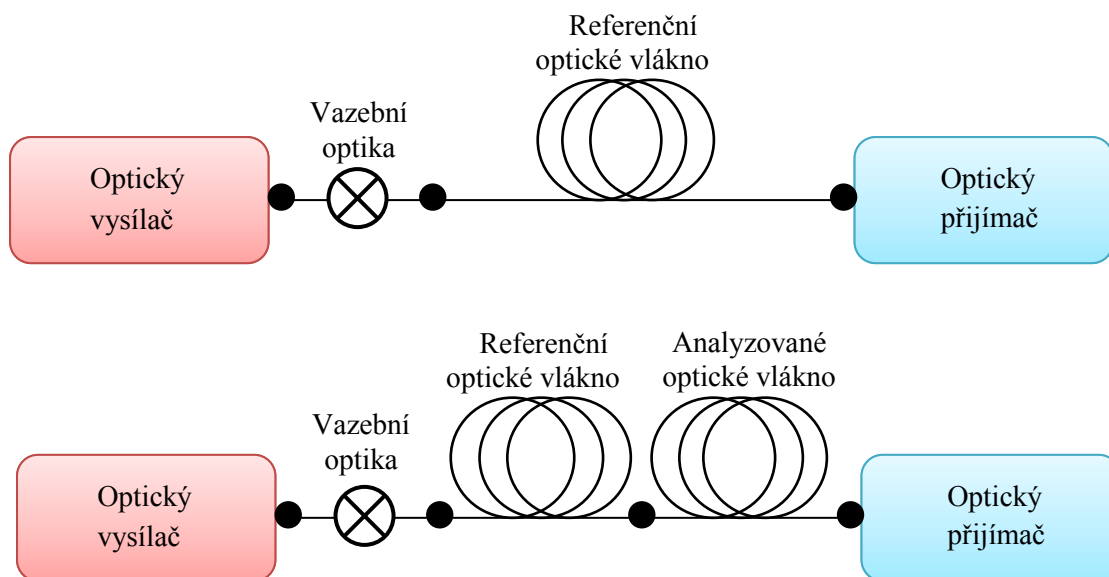
Jedním z hlavních cílů této práce bylo zjistit, jaký vliv má záření o vysokém výkonu na vlastnosti optického vlákna. Optické vlákno by mělo po zatížení vysokým výkonem zářením laseru buďto degradovat v čase, nebo zůstat stejné. Toto měření bylo provedeno experimentálně v laboratoři. V této kapitole budou shrnuty výsledky měření na optických vláknech před jejich zatížením i po jejich zatížení. Měření probíhalo pomocí metody vložných ztrát 1c a z důvodu nepřesného měření metodou měření v reálném čase.

5.1 Měření metodou vložných ztrát

Jako první byla měřena dvě vlákna o délce 20 metrů. Každé bylo zatěžováno jinou časovou dobou. První vlákno bylo zatěžováno 6 hodin, druhé vlákno 48 hodin maximálním výkonem laseru.

V prvním kroku bylo potřeba nachystat dva 20 metrové kusy optického vlákna. Bylo použito vlákno typu G.652D s útlumem 0,34 dB/km při vlnové délce 1330 nm a 0,20 dB/km při vlnové délce 1550 nm. Jako další krok bylo potřeba postupně navařit čtyři pigtaily. Pigtail je zaužívaný název pro optické vlákno s konektorem, které slouží jako ukončení optických tras jejich navařením na vlákna. Pomocí stahovacích kleští MILLER byla stáhnuta primární ochrana optického vlákna, přibližně 3-4 cm od konce vlákna. Pomocí bezvláknového kapesníčku namočeného do izopropylalkoholu určeným na čištění optických vláken se očištěli zbytky primární ochrany a konec vlákna. Pomocí speciální zalamovačky na optické vlákna byly zarovnané konce optických vláken. Posledním krokem bylo nutné svařit každý očištěný a zalomený konec vlákna s pigtailem. Pro toto svaření byla použita přenosná svářecí stanice typu Fujikura 45PM. Bylo nutné udělat co nejlepší sváry, kvůli dosažení minimálního útlumu.

Po nachystání všech pomůcek bylo možné začít měřit vlákno před jeho zatěžováním a zjistit tak jeho celkový útlum. K měření byla použita metoda vložných ztrát, která je nedestruktivní metodou měření útlumu na optických vláknech. K samotnému měření byl použit optický přijímač, optický vysílač, patch cordy (propojovací kabely) a naše měřené vlákno. Podle schématu zapojení na obrázku 5.1 byl změřen útlum vláken v obou směrech 10krát. Měření proběhlo na vlnových délkách 1310 nm a 1550 nm.



Obrázek 5.1: Schéma měření útlumu na optické trase pomocí metody vložených ztrát

Po změření obou vláken bylo jedno po druhém postupně připojeno k výstupu laseru, a zatěžované v dobách 6 a 48 hodin. Do obou vláken byl pumpován maximální výkon laseru 320 mW. Po tomto experimentu byla vlákna znovu změřena pomocí metody vložených ztrát a všechny hodnoty zprůměrovány. Všechny naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulkách 1.1 až 1.4.

1. směr	Před zátěží	Před zátěží	Po zátěži	Po zátěži
Číslo měření	1310 nm [dB]	1550 nm [dB]	1310 nm [dB]	1550 nm [dB]
1	1,00	0,76	0,35	0,20
2	0,77	0,60	0,33	0,50
3	0,46	0,40	0,25	0,48
4	0,68	0,57	0,30	0,28
5	0,64	0,58	0,25	0,38
6	1,04	0,83	0,36	0,41
7	0,78	0,65	0,34	0,36
8	0,60	0,40	0,34	0,45
9	0,83	0,67	0,33	0,49
10	0,44	0,35	0,41	0,37
Průměr	0,725	0,725	0,335	0,395

Tabulka 1.1: Naměřené hodnoty útlumu optického vlákna délky 20 metrů před a po jeho zátěži 6 hodin v 1. směru.

2. směr	Před zátěží	Před zátěží	Po zátěži	Po zátěži
Číslo měření	1310 nm [dB]	1550 nm [dB]	1310 nm [dB]	1550 nm [dB]
1	0,63	0,47	0,50	0,63
2	0,39	0,23	0,52	0,61
3	0,31	0,25	0,59	0,49
4	0,71	0,61	0,45	0,66
5	1,03	0,86	0,53	0,48
6	1,10	0,90	0,50	0,68
7	0,98	0,82	0,53	0,68
8	0,87	0,75	0,47	0,65
9	0,85	0,67	0,55	0,77
10	0,77	0,64	0,51	0,57
Průměr	0,81	0,655	0,515	0,64

Tabulka 1.2: Naměřené hodnoty útlumu optického vlákna délky 20 metrů před a po jeho zátěži 6 hodin v 2. směru.

1. směr	Před zátěží	Před zátěží	Po zátěži	Po zátěži
Číslo měření	1310 nm [dB]	1550 nm [dB]	1310 nm [dB]	1550 nm [dB]
1	0,85	0,64	0,07	0,07
2	0,72	0,57	0,04	0,00
3	0,84	0,55	0,05	0,00
4	0,77	0,40	0,04	0,01
5	0,87	0,78	0,06	0,02
6	0,79	0,78	0,08	0,01
7	0,80	0,94	0,08	0,02
8	0,83	0,81	0,07	0,00
9	0,83	0,91	0,07	0,00
10	0,77	0,91	0,08	0,01
Průměr	0,815	0,78	0,07	0,01

Tabulka 1.3: Naměřené hodnoty útlumu optického vlákna délky 20 metrů před a po jeho zátěži 48 hodin v 1. směru.

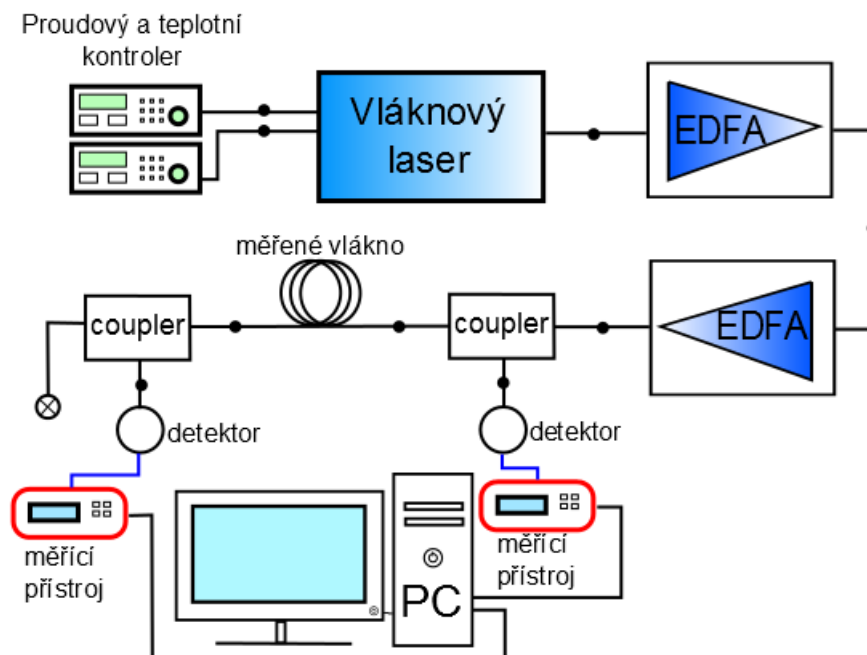
2. směr	Před zátěží	Před zátěží	Po zátěži	Po zátěži
Číslo měření	1310 nm [dB]	1550 nm [dB]	1310 nm [dB]	1550 nm [dB]
1	1,06	0,51	0,19	0,20
2	0,98	0,87	0,20	0,21
3	1,09	0,79	0,17	0,20
4	1,09	0,88	0,18	0,20
5	1,11	0,86	0,14	0,17
6	1,10	0,90	0,14	0,19
7	1,04	1,04	0,15	0,20
8	1,02	1,11	0,17	0,21
9	0,95	1,00	0,14	0,19
10	1,01	1,10	0,13	0,20
Průměr	1,05	0,89	0,16	0,2

Tabulka 1.4: Naměřené hodnoty útlumu optického vlákna délky 20 metrů před a po jeho zátěži 48 hodin v 2. směru.

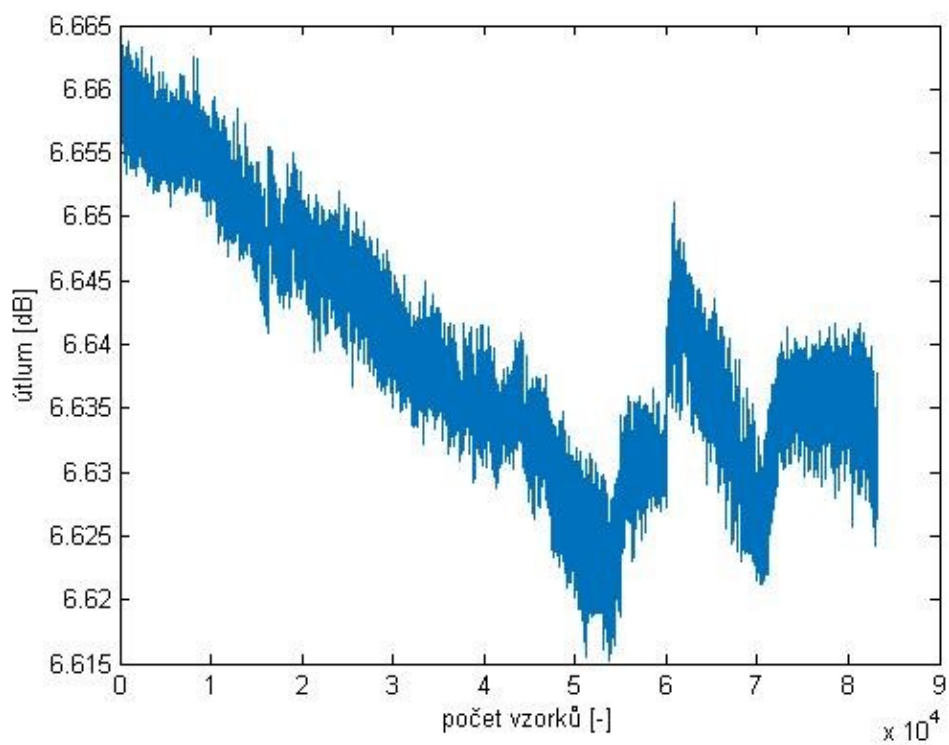
Z tabulek uvedených výše můžeme pozorovat, že měření neproběhlo zcela tak, jak jsme očekávali. U prvního i druhého vlákna byly zaznamenány poklesy útlumu. To mohlo být zapříčiněno tím, že špatné zapojení konektorů nebo spojek může mít vyšší útlum, než útlum samotného vlákna délky 20 metrů. Další možnou příčinou mohla být krátká doba zátěže vlákna. Měření útlumu pomocí metody vložných ztrát tedy byla špatně zvolená metoda pro měření útlumu na optické trase. Z tohoto důvodu se zvolila jiná metoda měření a jiná doba zátěže pro delší vlákno.

5.2 Měření útlumu v reálném čase

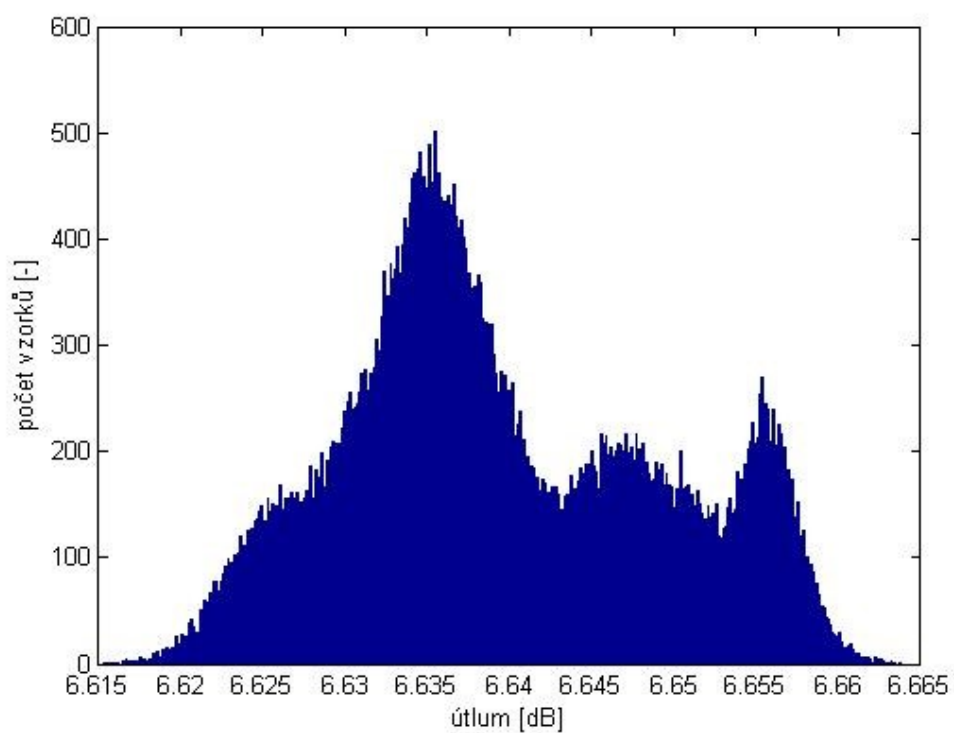
Z důvodu špatně vybrané měřicí metody u 20 metrového vlákna, byla použita jiná měřicí metoda u vlákna s délkou 1,5 km. Šlo o metodu měření v reálném čase, kde se výsledky ukládaly do počítače během 18 dnů v nastaveném časovém intervalu 1 sekundy. Byl použit laser a zesilovače jako v předchozím měření. K tomuto měření bylo potřebné vlákno na měření, dva děliče, dva detektory, dva měřicí přístroje a počítač s potřebným softwarem. Na oba děliče i na vlákno bylo potřebné nejdříve navařit pigtaily. Poté byl připojen jeden dělič na výstup druhého zesilovače s dělicím výkonem 98% k 2%. Výstup s 2% výkonu byl připojen do detektoru, z něj do měřicího přístroje a ten následně do počítače. Výstup s 98% výkonu byl dále připojen k zatěžovanému vláknu. Na druhém konci zatěžovaného vlákna byl připojen druhý dělič. Jeho výstupy byli opět rozděleny na 98% k 2%. 2% výkonu šlo do druhého detektoru, z něj do druhého měřicího přístroje a ten byl následně opět připojen k počítači. 98% výstup byl zakrytý ochranným krytem z důvodu nebezpečně vysokého záření. Posledním krokem bylo zapnutí laserového systému, detektorů, měřicích přístrojů a softwaru V-Drive na počítači a začít tak zatěžovat vlákno po dobu 18 dnů. Na následujících grafech jsou naměřené hodnoty útlumů pro každý měřený den, histogramy a statisticky vyhodnocená směrodatná odchylka, střední hodnota a celkový útlum. Na obrázku 5.2 je uvedena schéma zapojení.



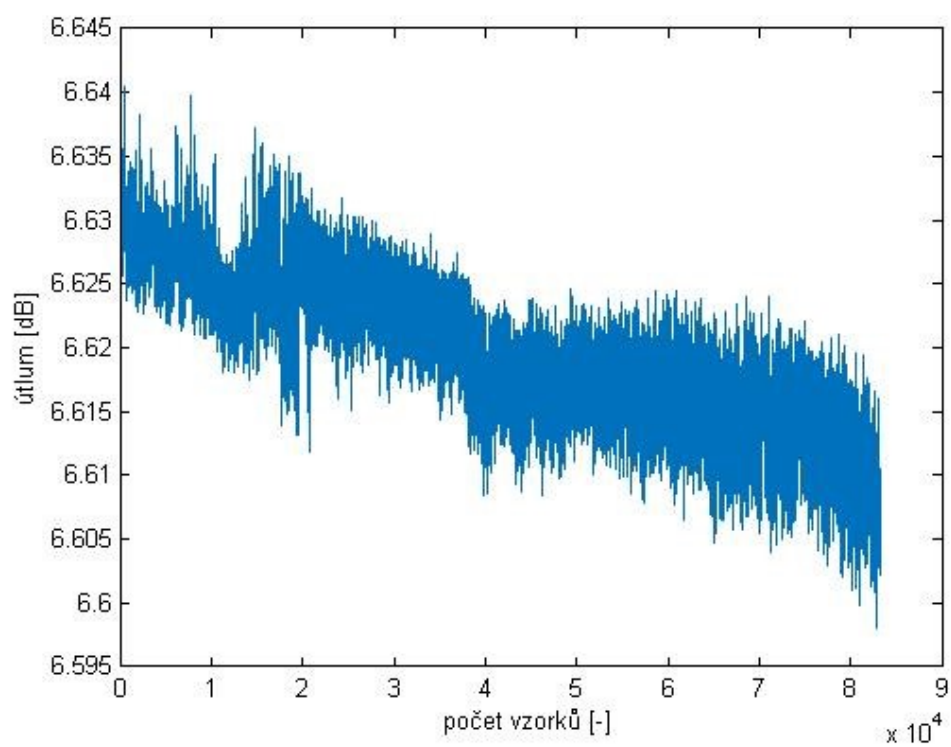
Obrázek 5.2: Schéma zapojení měření v reálném čase



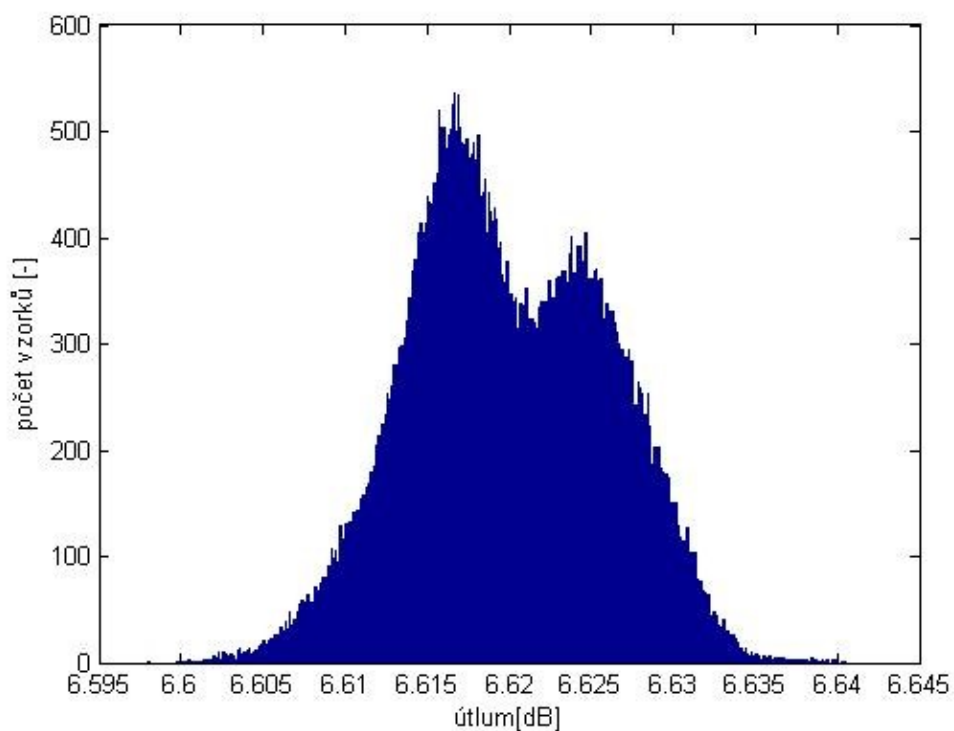
Obrázek 5.3: Naměřený útlum 1. den



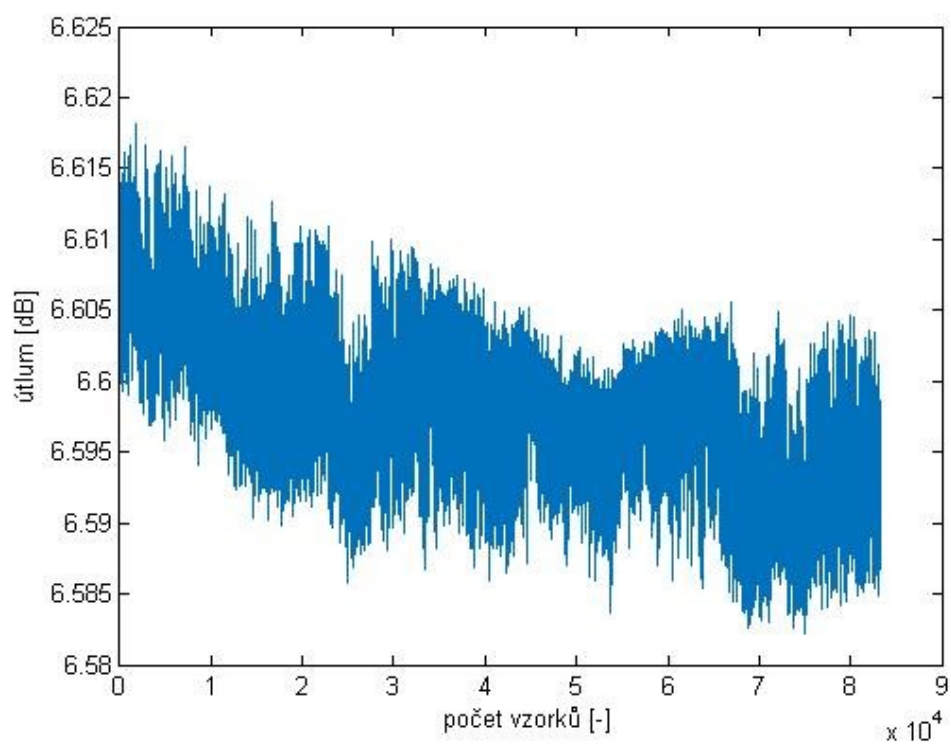
Obrázek 5.4: Histogram 1. dne



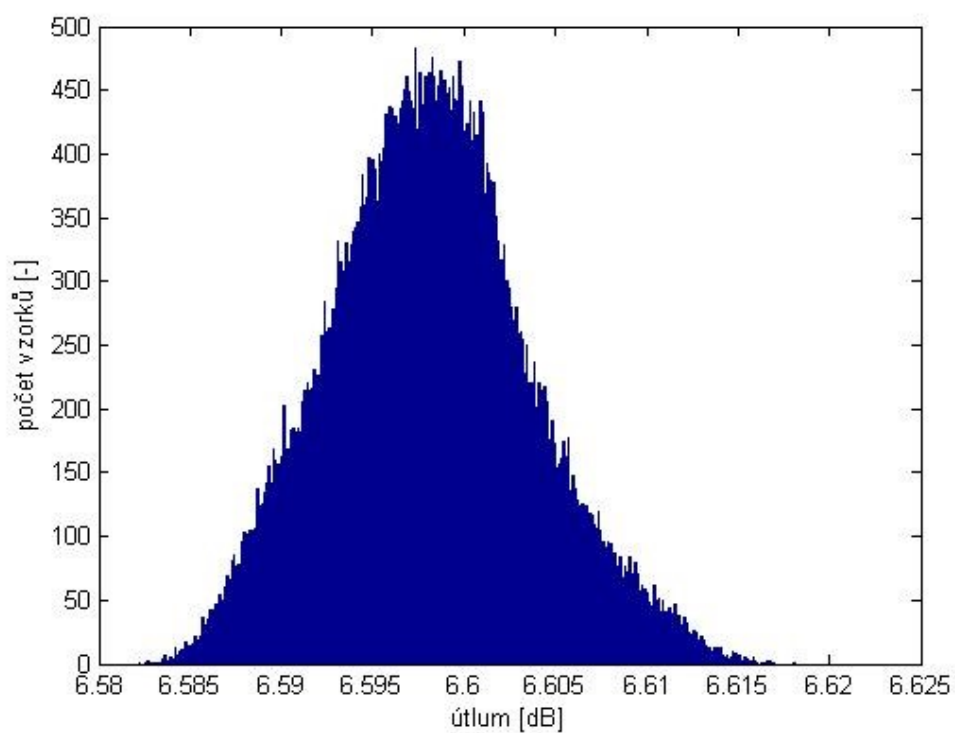
Obrázek 5.5: Naměřený útlum 2. den



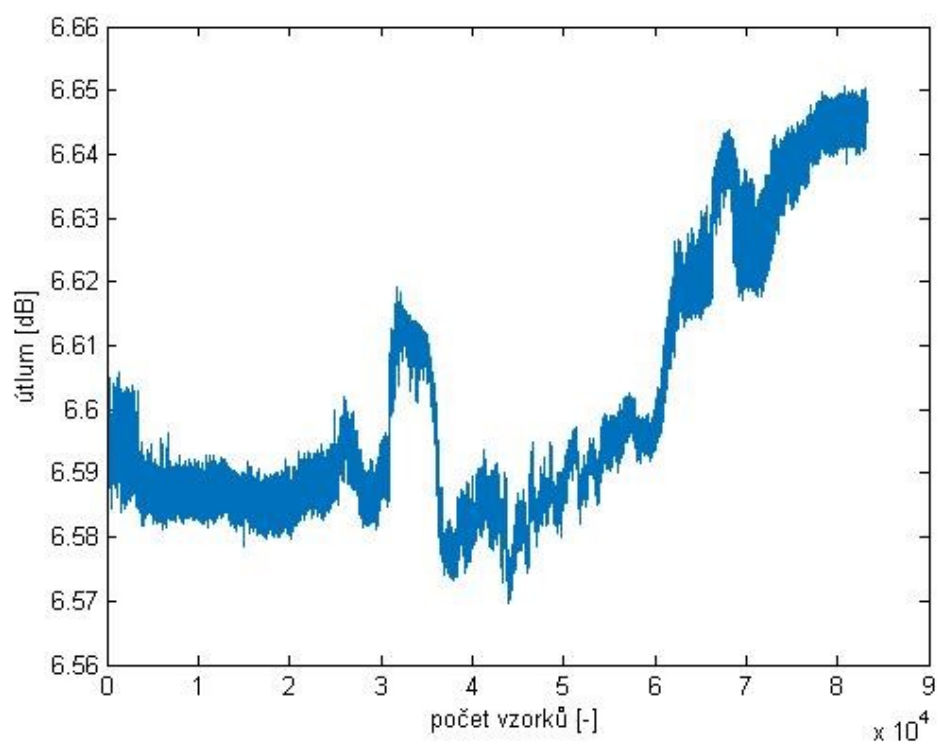
Obrázek 5.6: Histogram 2. dne



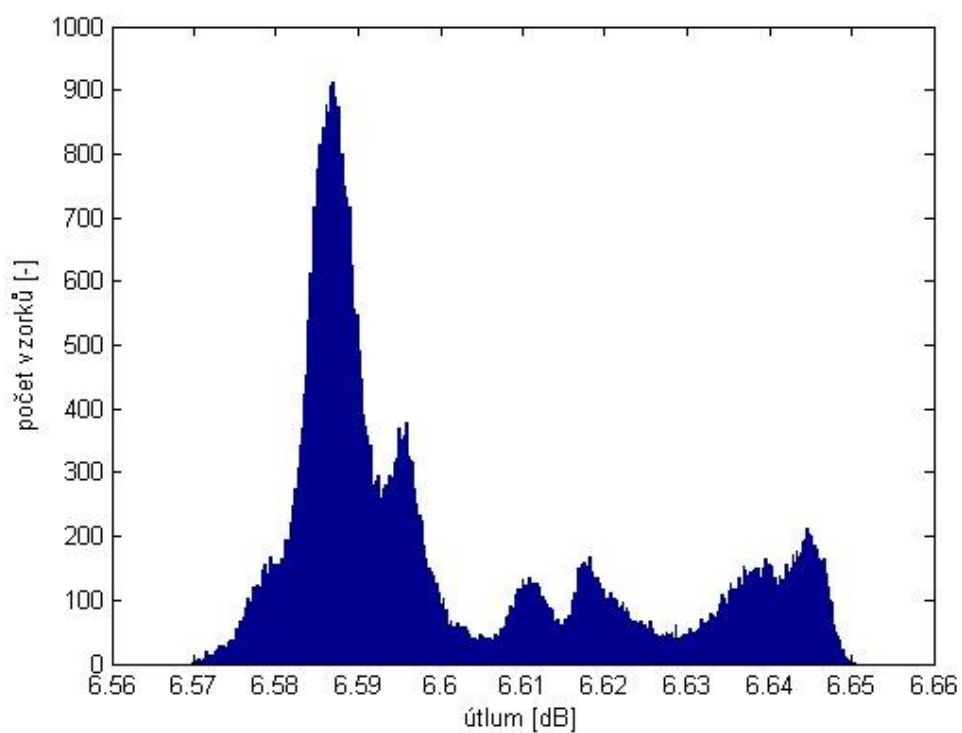
Obrázek 5.7: Naměřený útlum 3. den



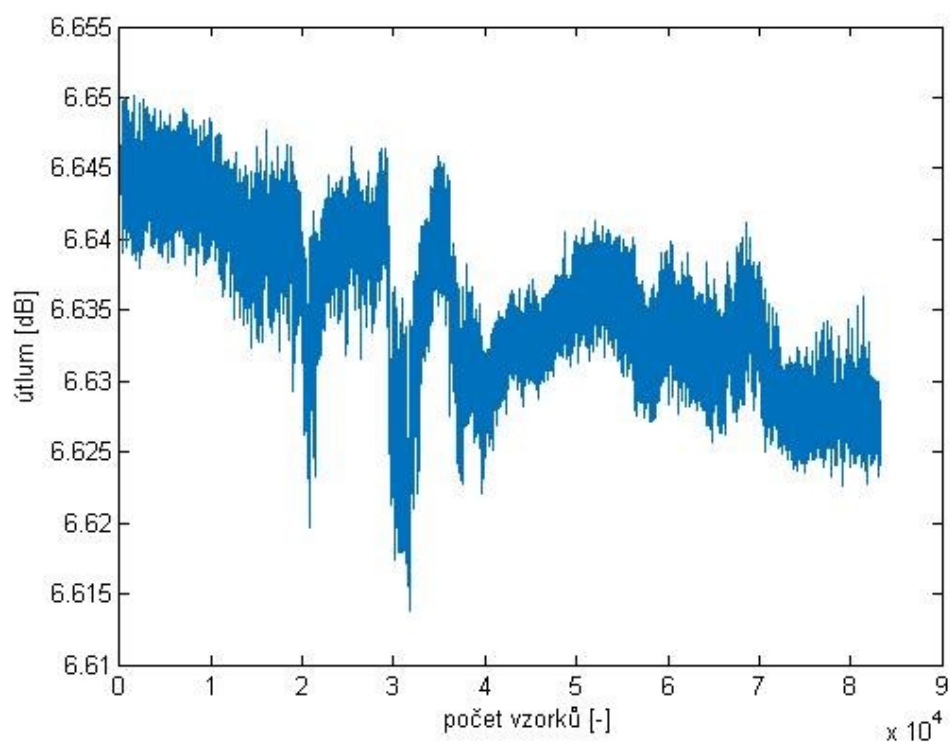
Obrázek 5.8: Histogram 3. dne



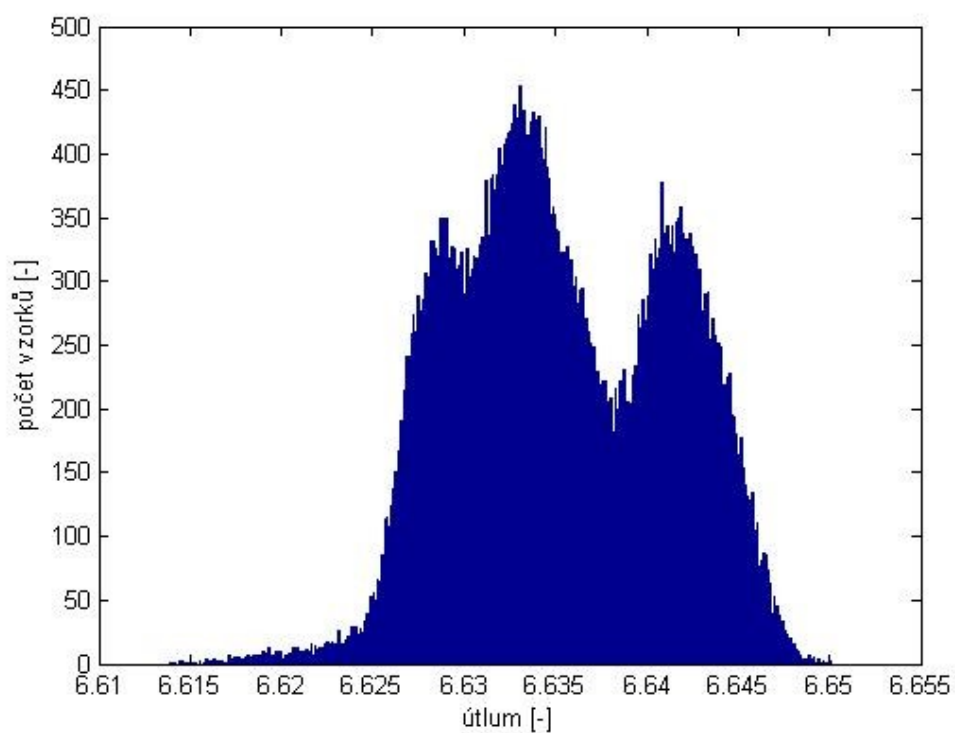
Obrázek 5.9: Naměřený útlum 4. den



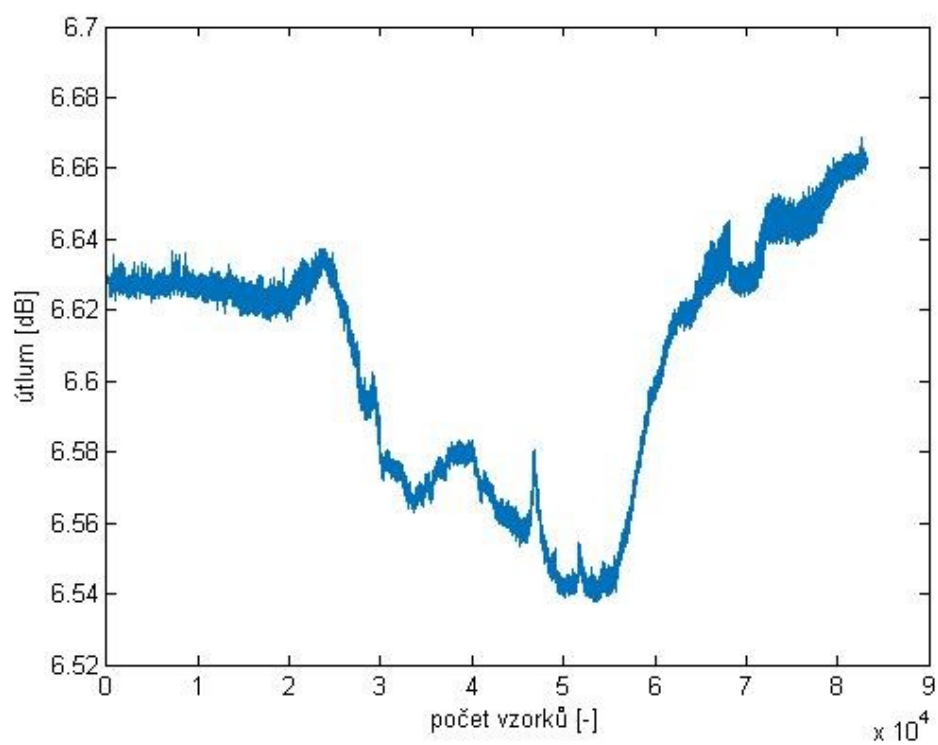
Obrázek 5.10: Histogram 4. dne



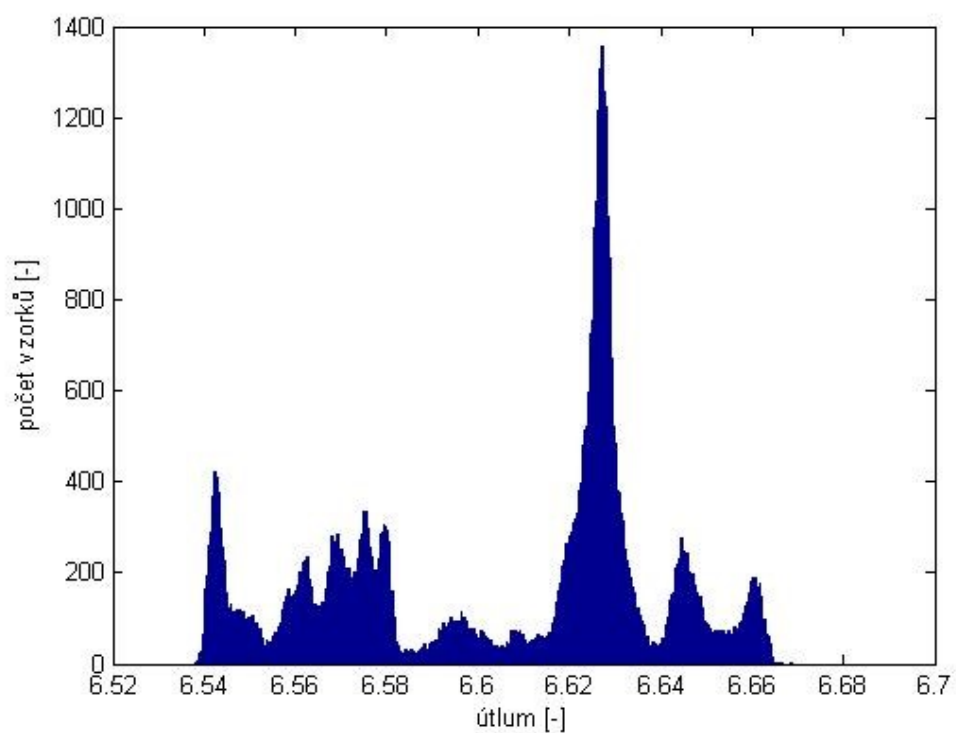
Obrázek 5.11: Naměřený útlum 5. den



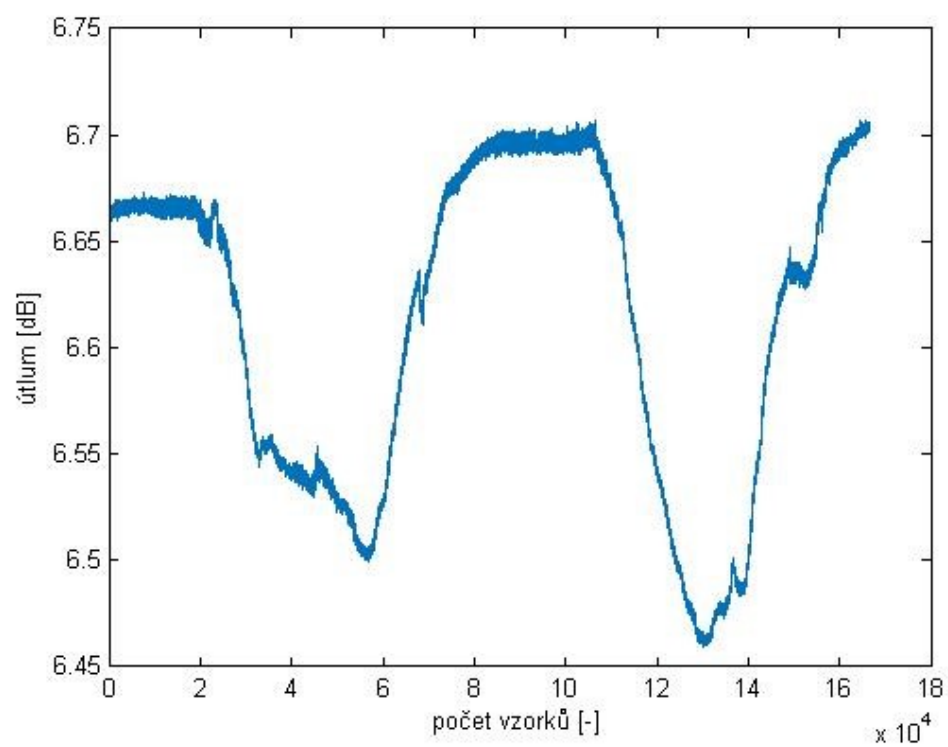
Obrázek 5.12: Histogram 5. dne



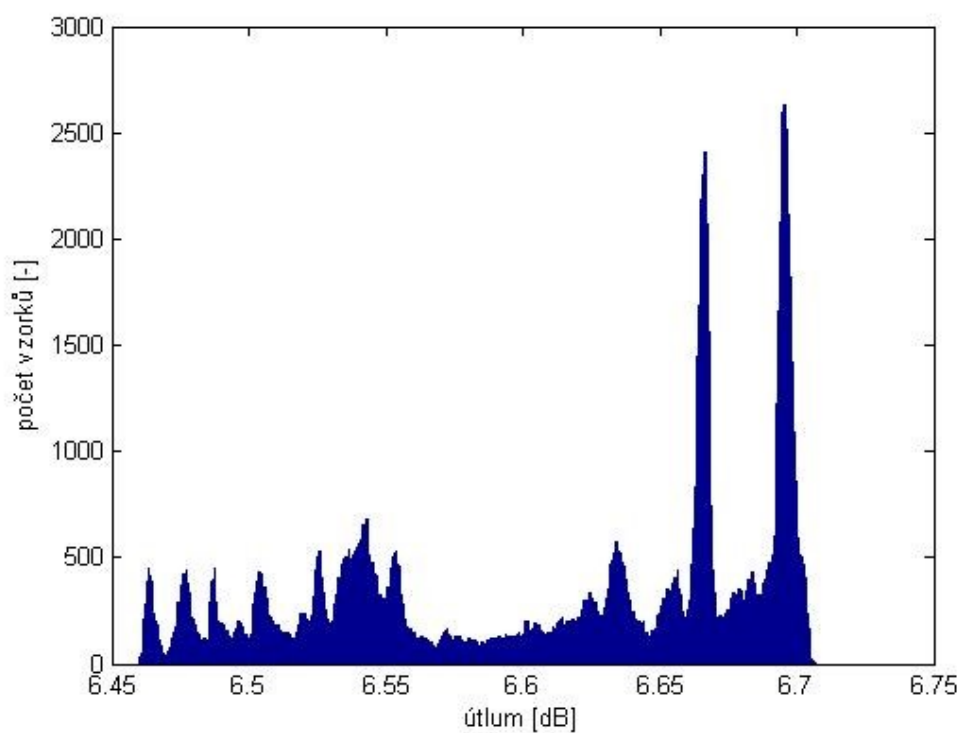
Obrázek 5.13: Naměřený útulum 6. Den



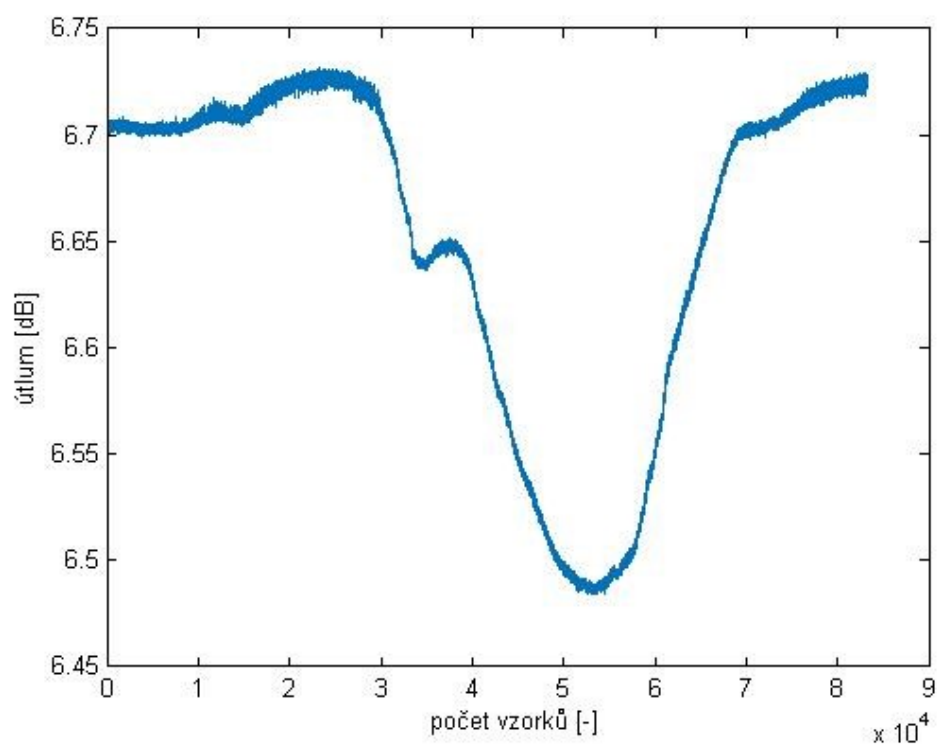
Obrázek 5.14: Histogram 6. dne



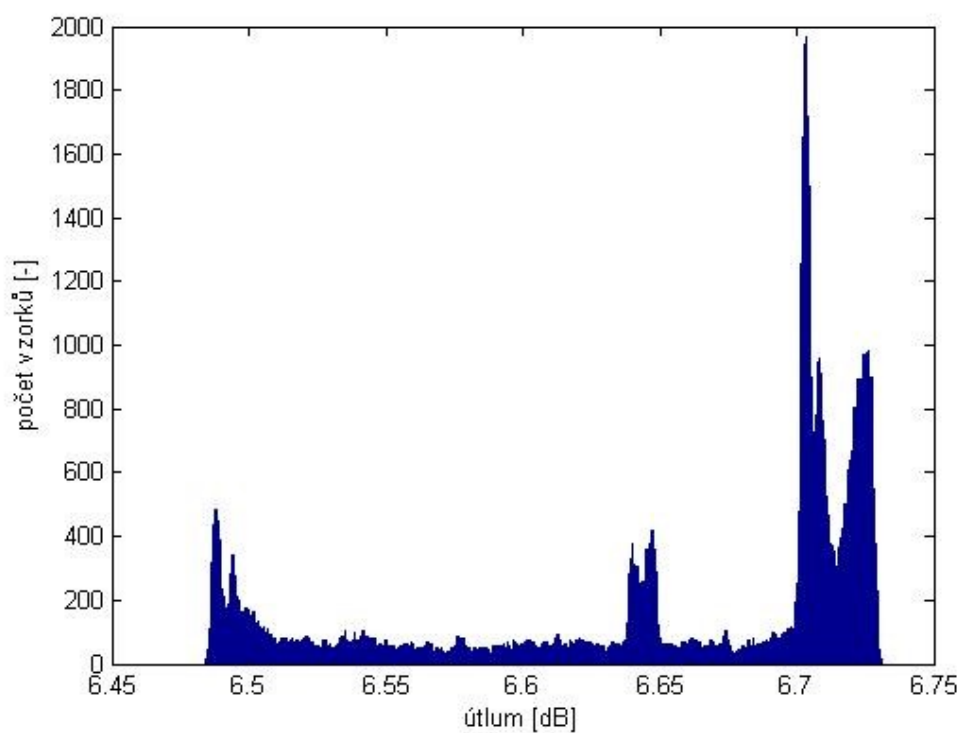
Obrázek 5.15: Naměřený útulum 7. den



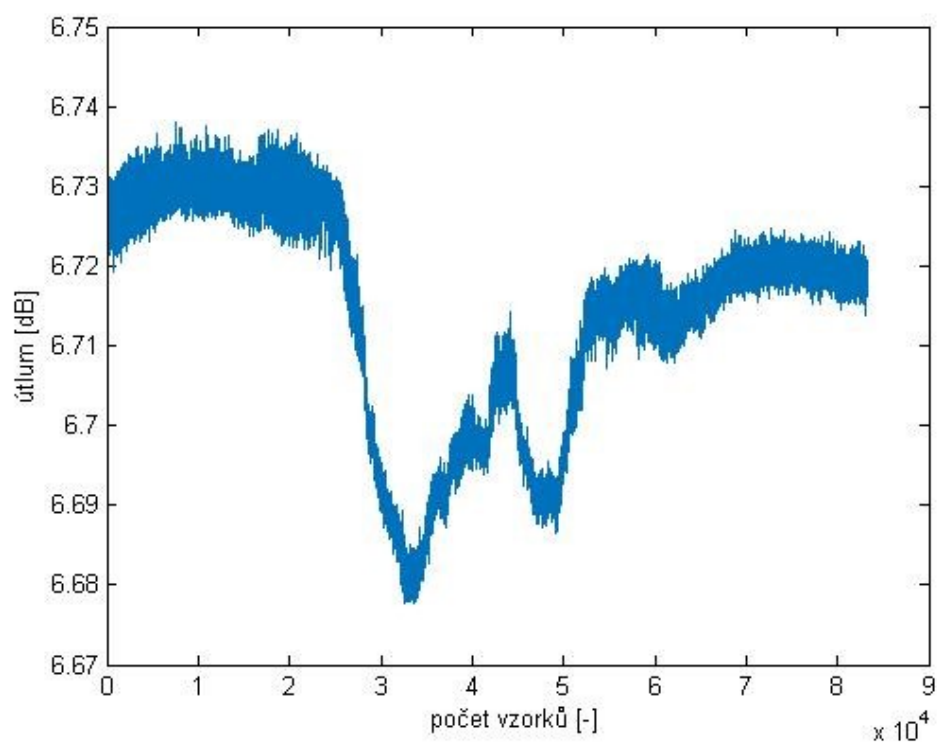
Obrázek 5.16: Histogram 7. dne



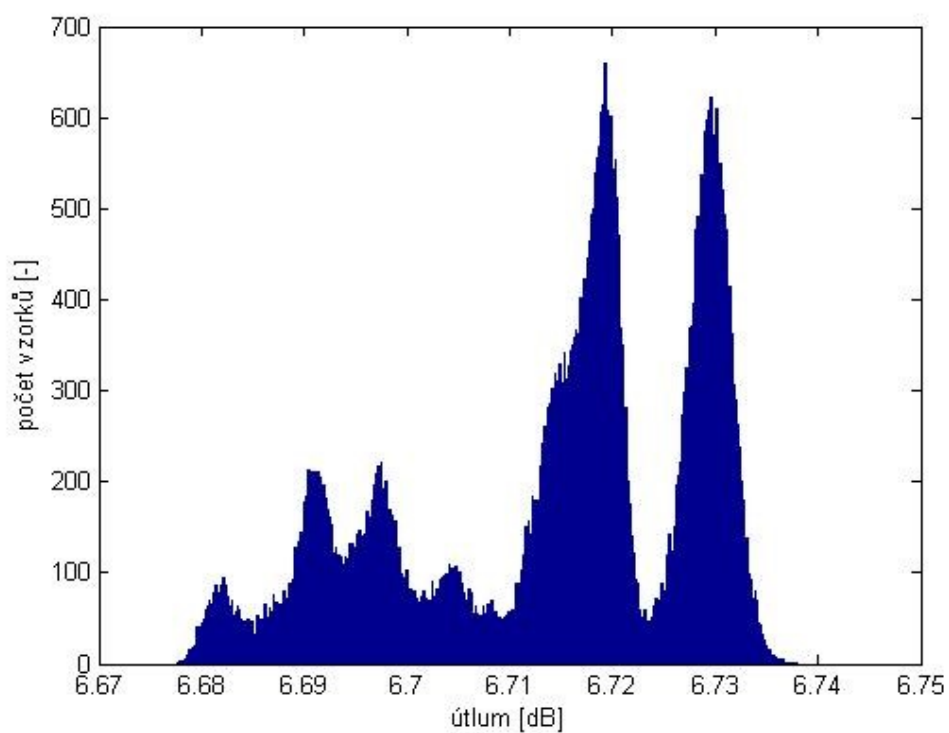
Obrázek 5.17: Naměřený útulum 8. den



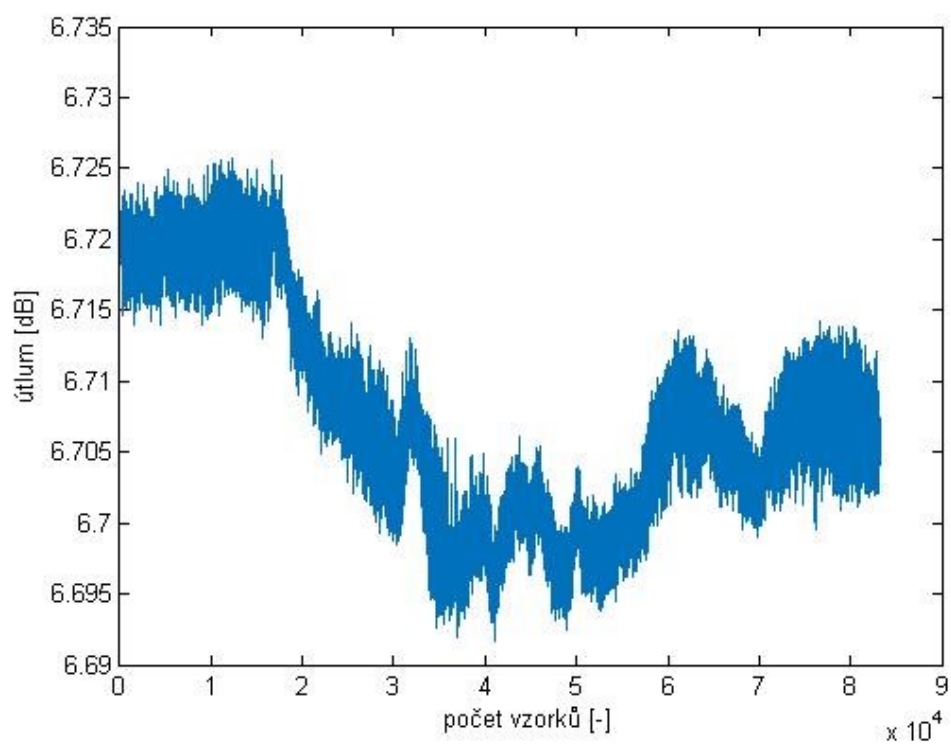
Obrázek 5.18: Histogram 8. dne



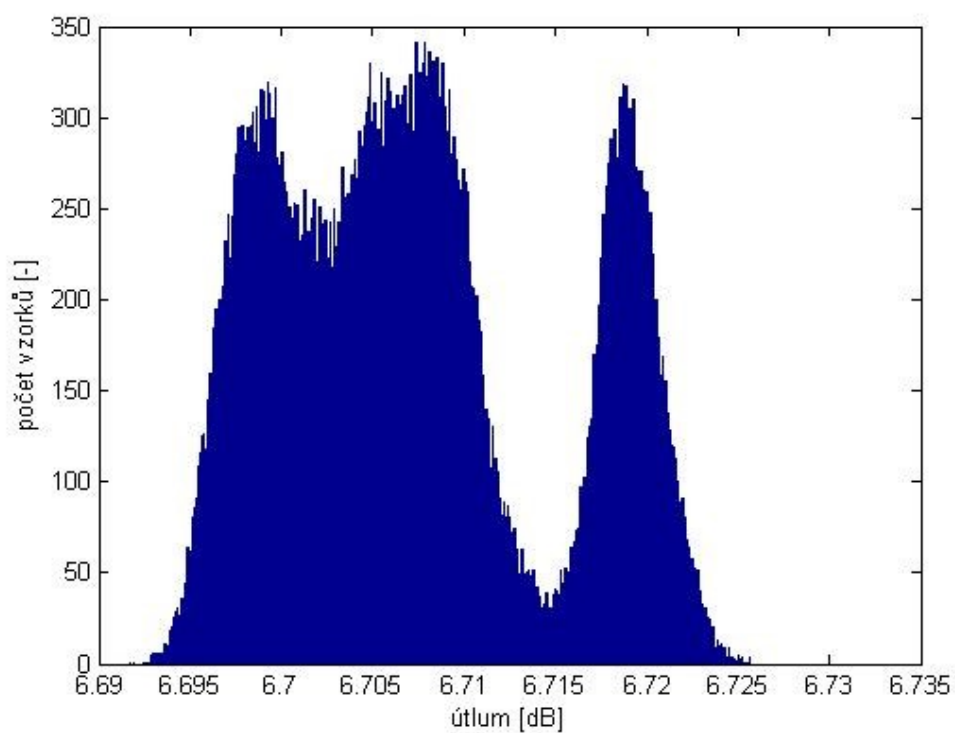
Obrázek 5.19: Naměřený útlum 9. den



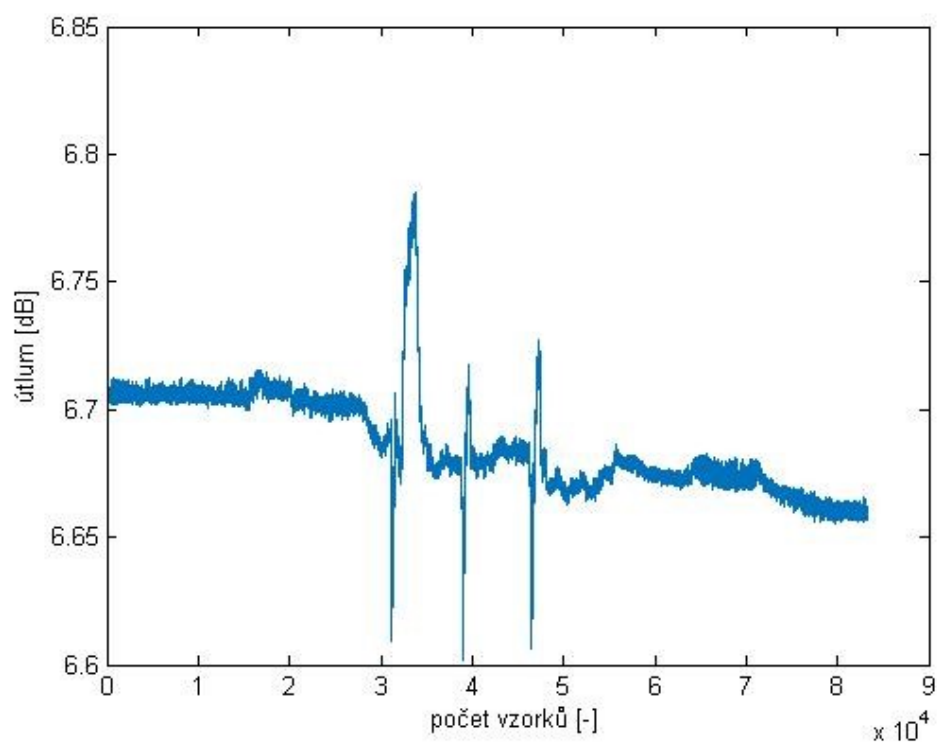
Obrázek 5.20: Histogram 9. dne



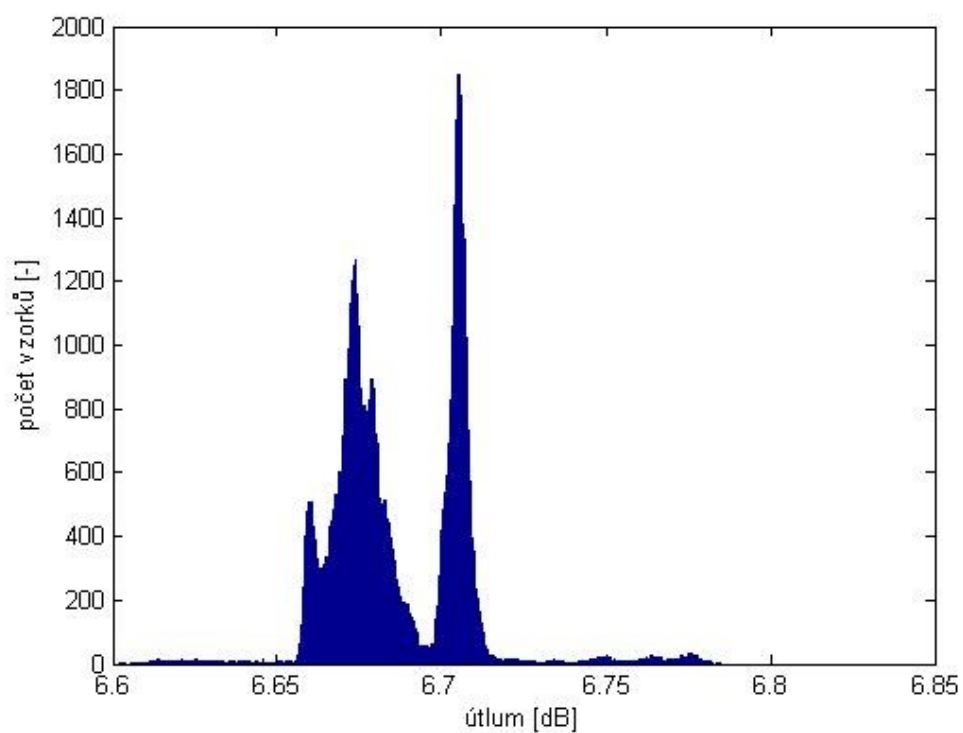
Obrázek 5.21: Naměřený útlum 10. den



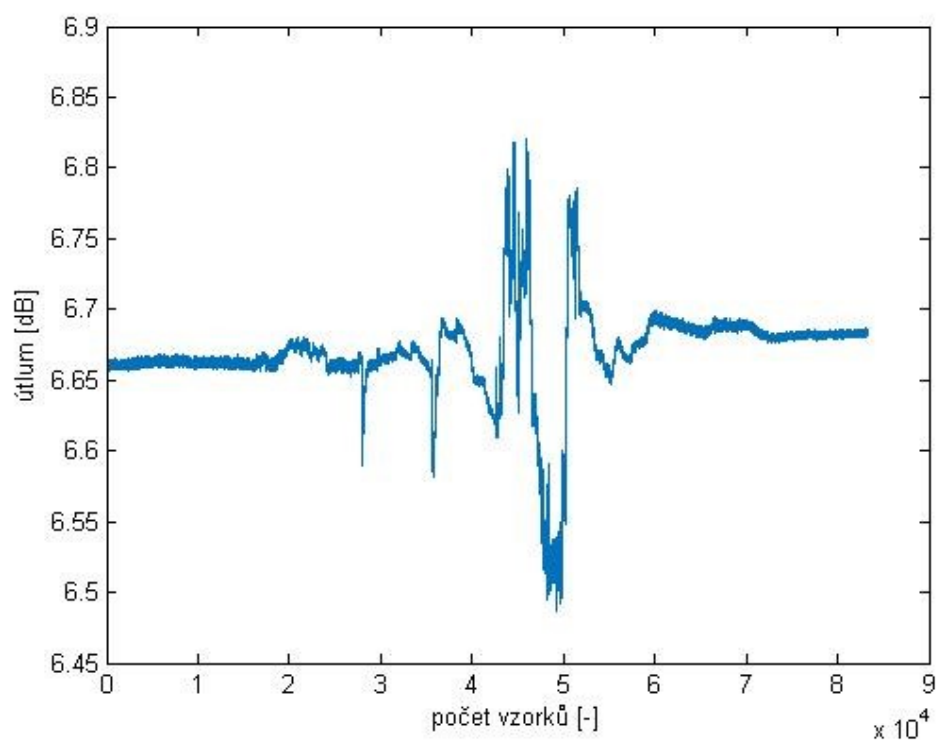
Obrázek 5.22: Histogram 10. dne



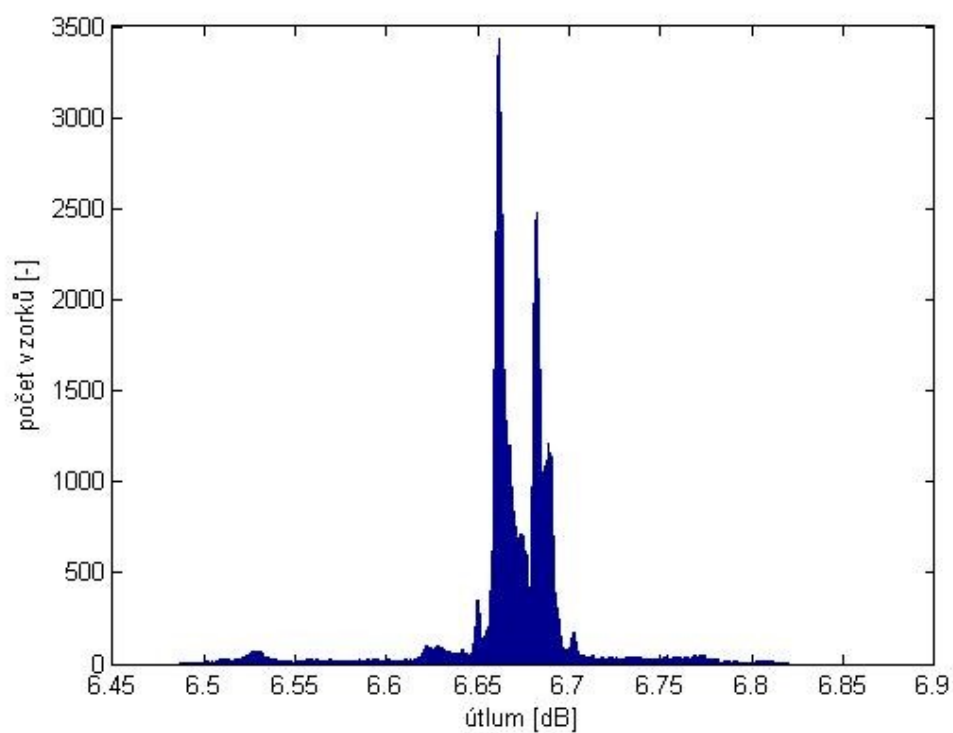
Obrázek 5.23: Naměřený útlum 11. den



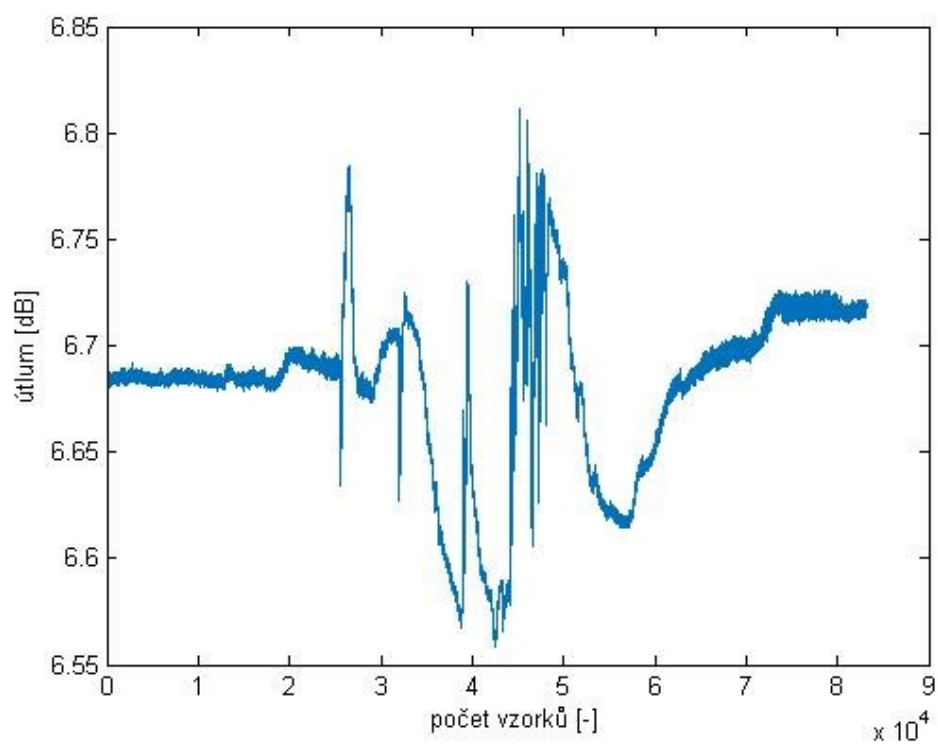
Obrázek 5.24: Histogram 11. dne



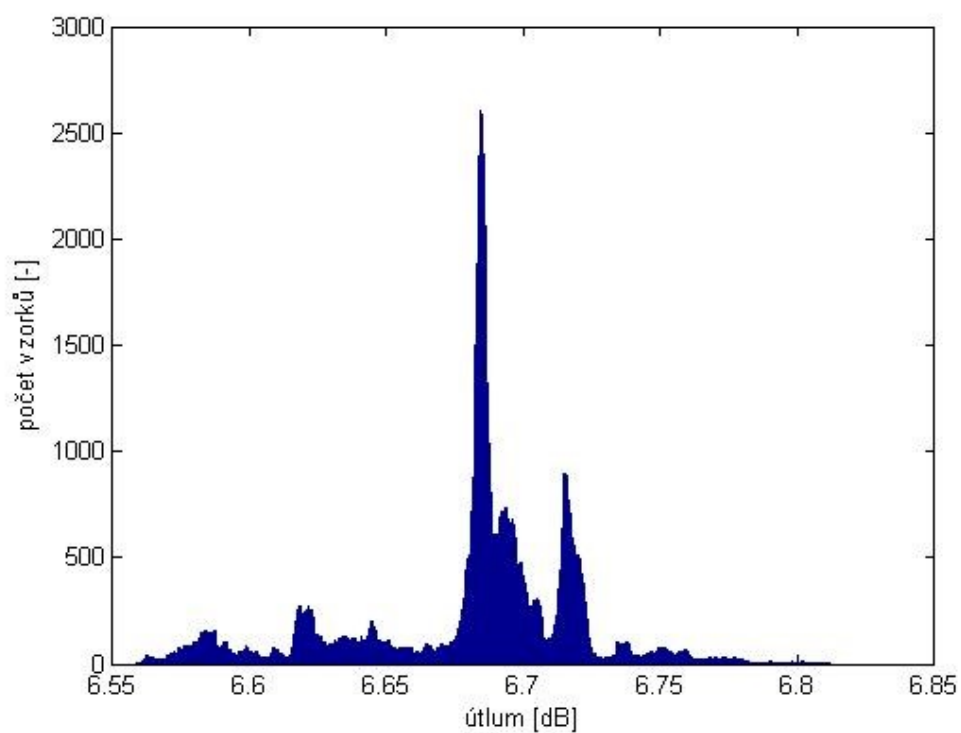
Obrázek 5.25: Naměřený útulum 12. den



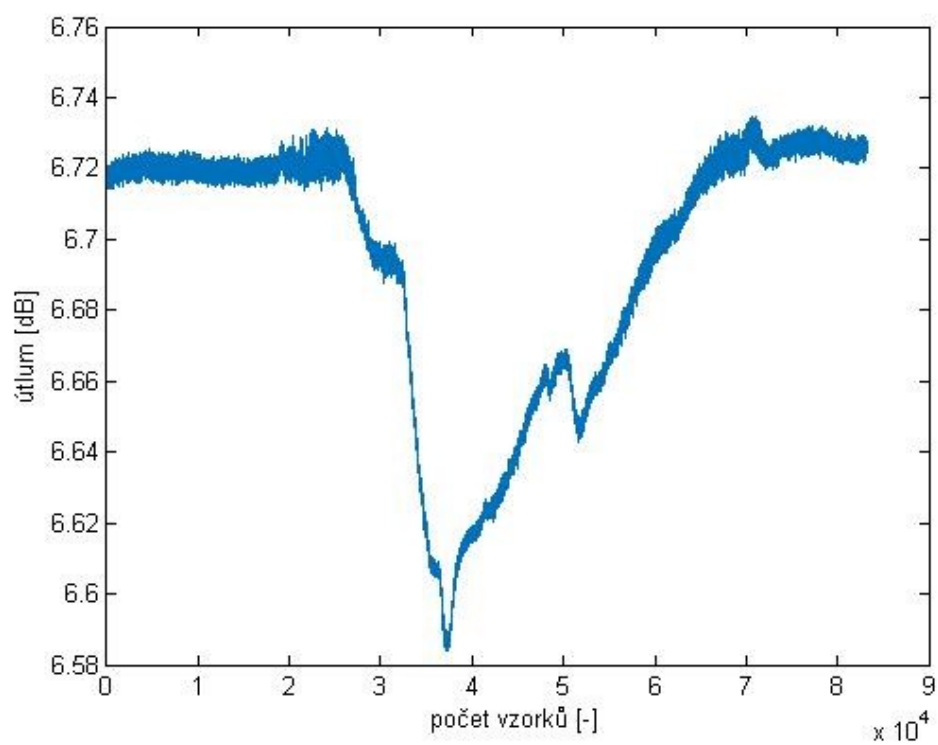
Obrázek 5.26: Histogram 12. dne



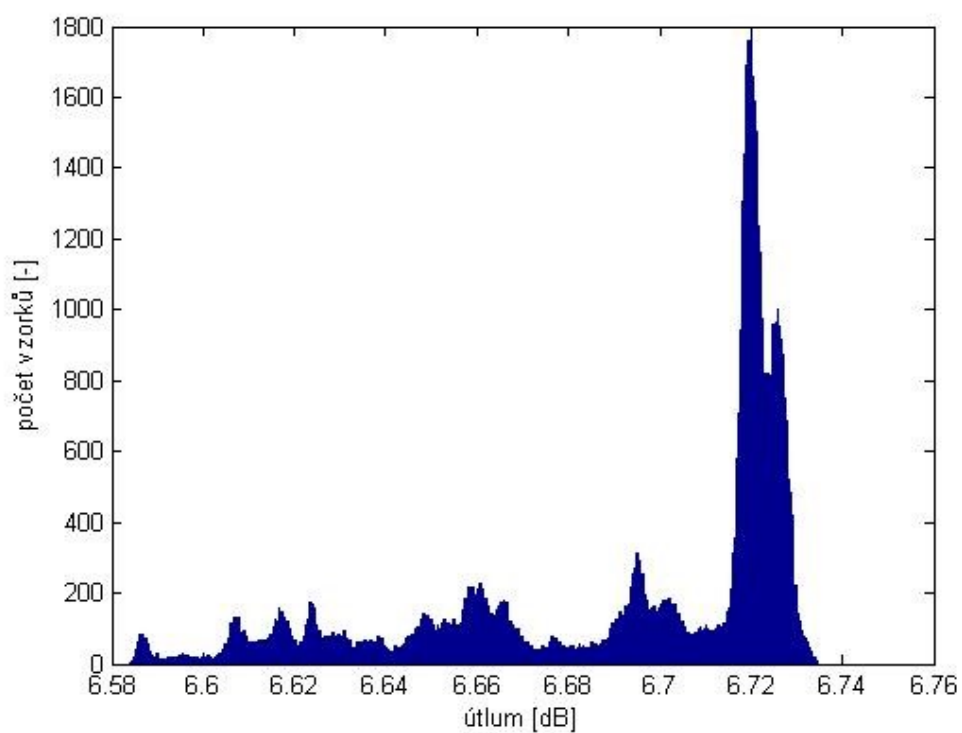
Obrázek 5.27: Naměřený útulum 13. den



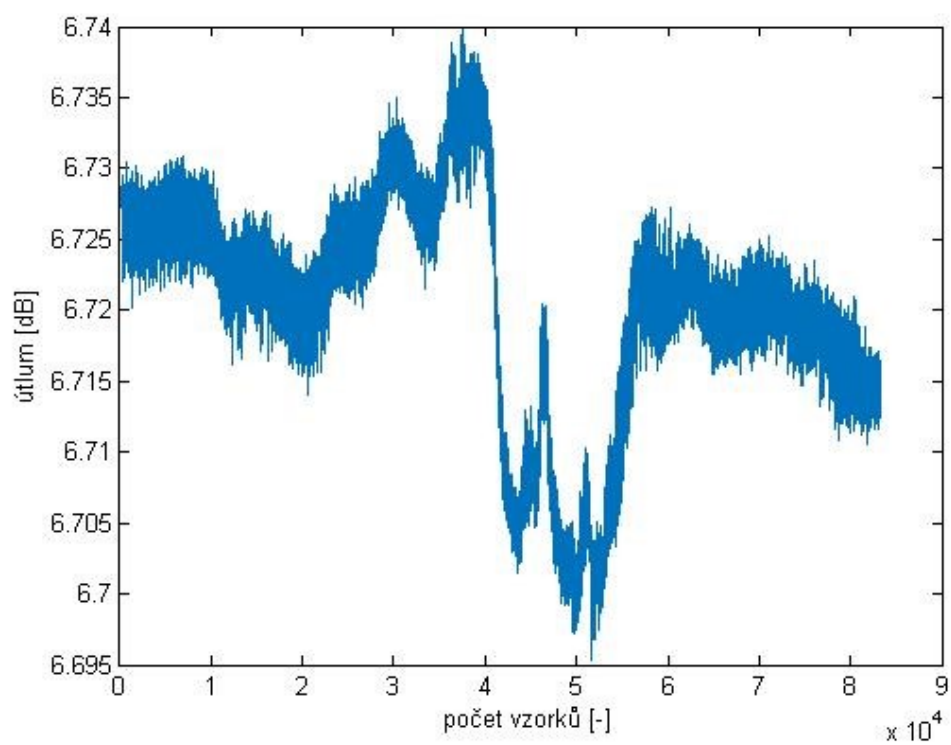
Obrázek 5.28: Histogram 13. dne



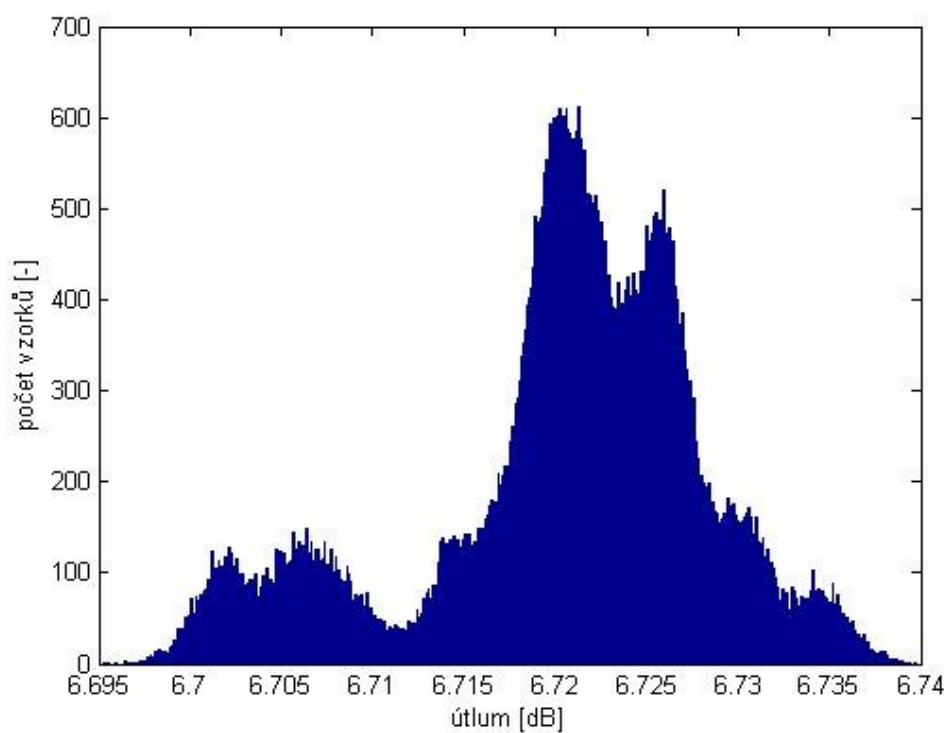
Obrázek 5.29: Naměřený útulum 14. den



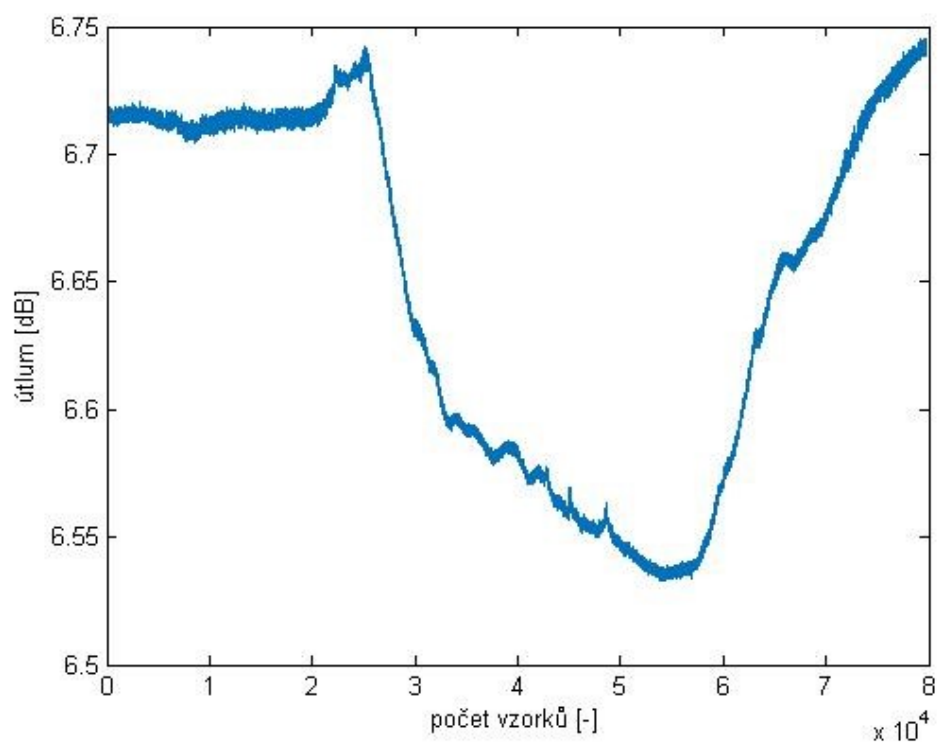
Obrázek 5.30: Histogram 14. dne



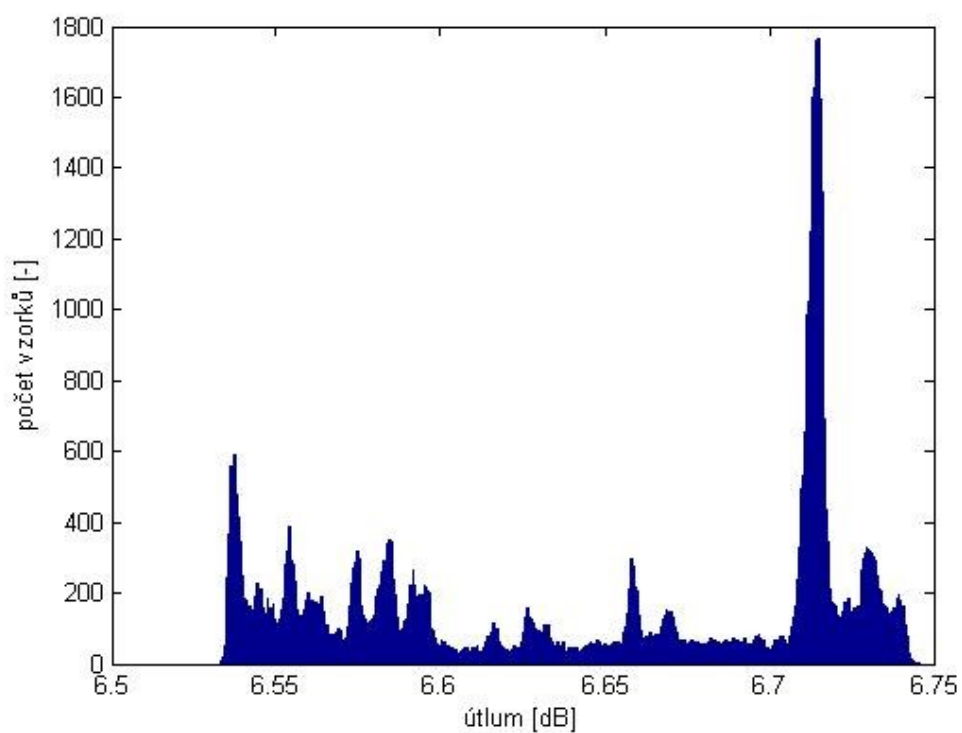
Obrázek 5.31: Naměřený útlum 15. den



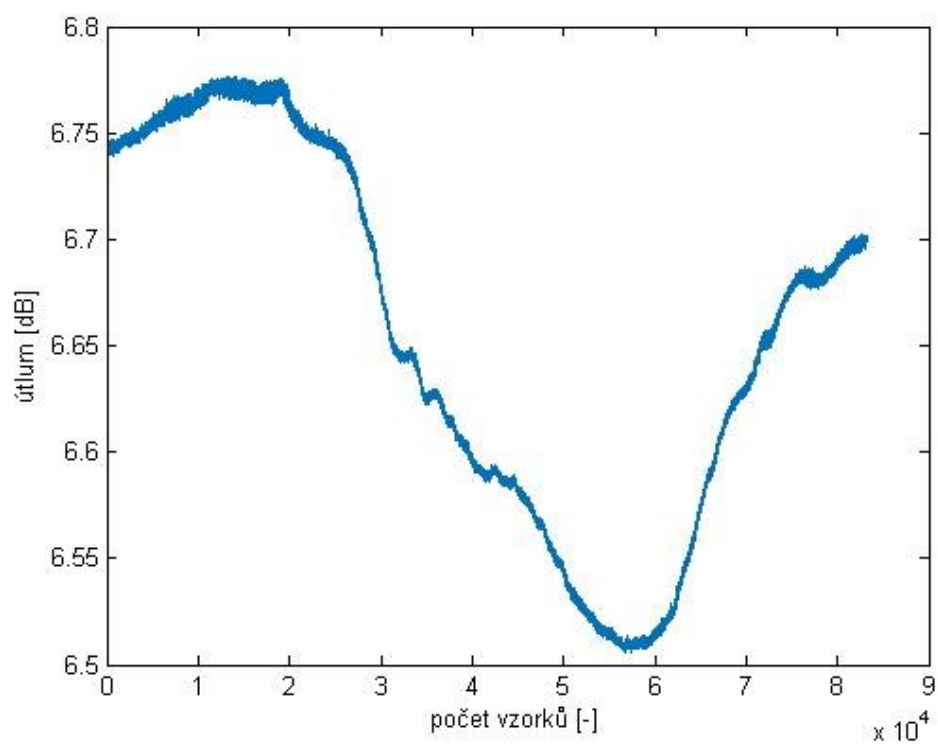
Obrázek 5.32: Histogram 15. dne



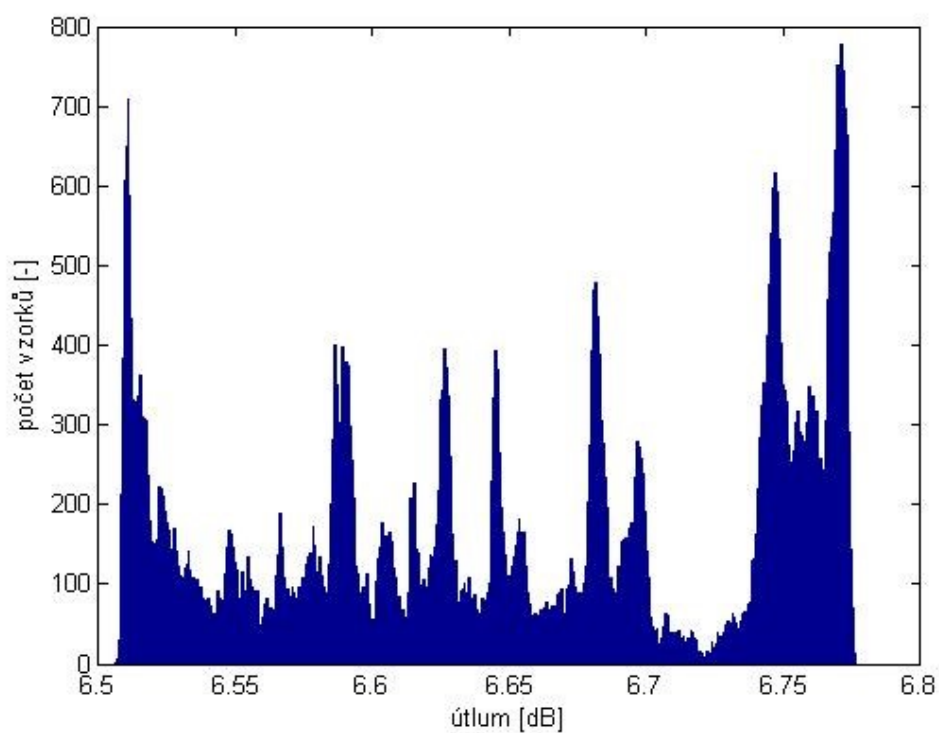
Obrázek 5.33: Naměřený útulum 16. den



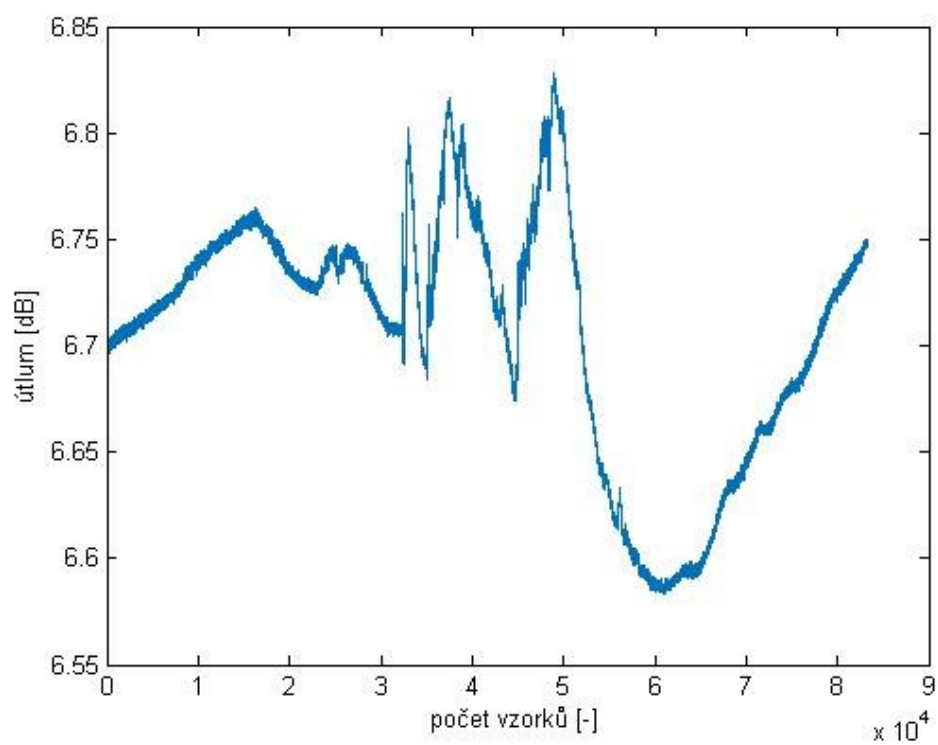
Obrázek 5.34: Histogram 16. dne



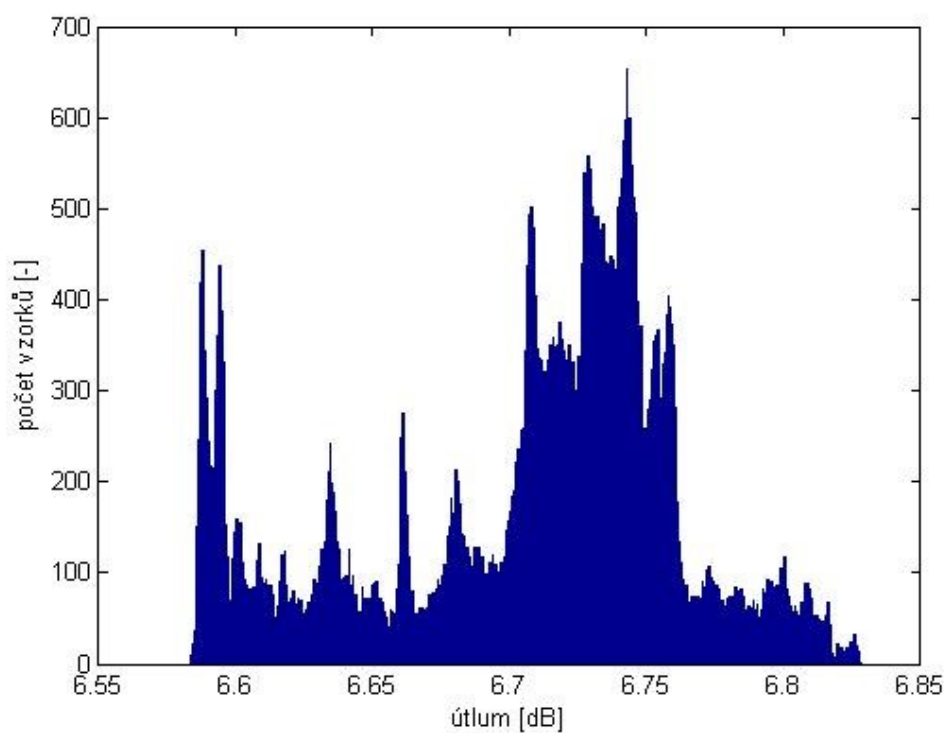
Obrázek 5.35: Naměřený útlum 17. den



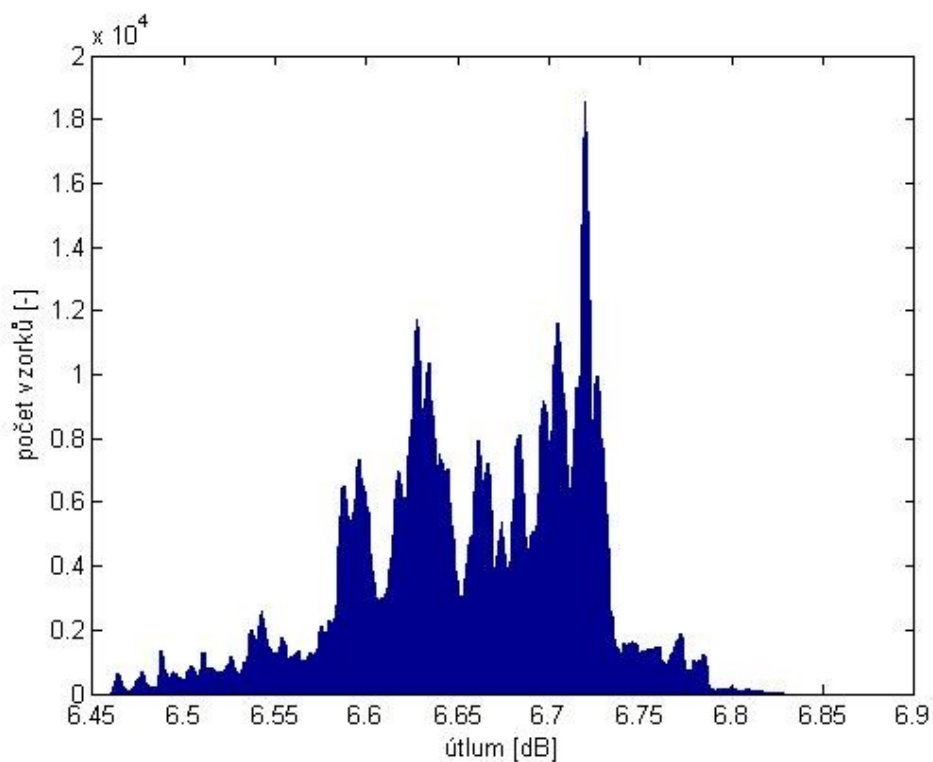
Obrázek 5.36: Histogram 17. dne



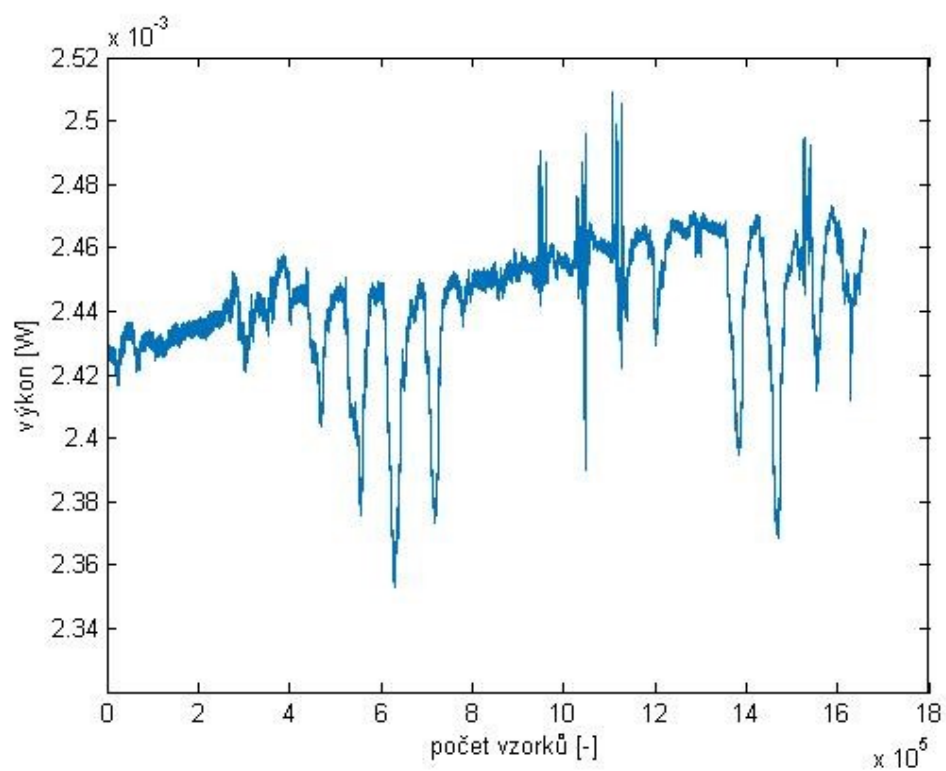
Obrázek 5.37: Naměřený útlum 18. den



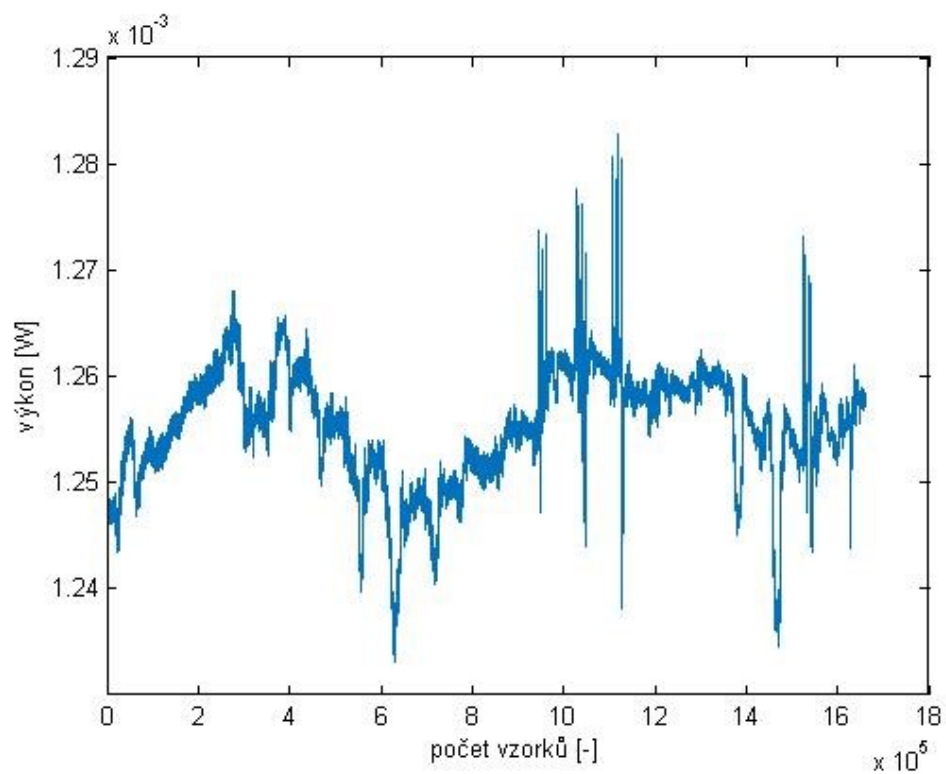
Obrázek 5.38: Histogram 18. dne



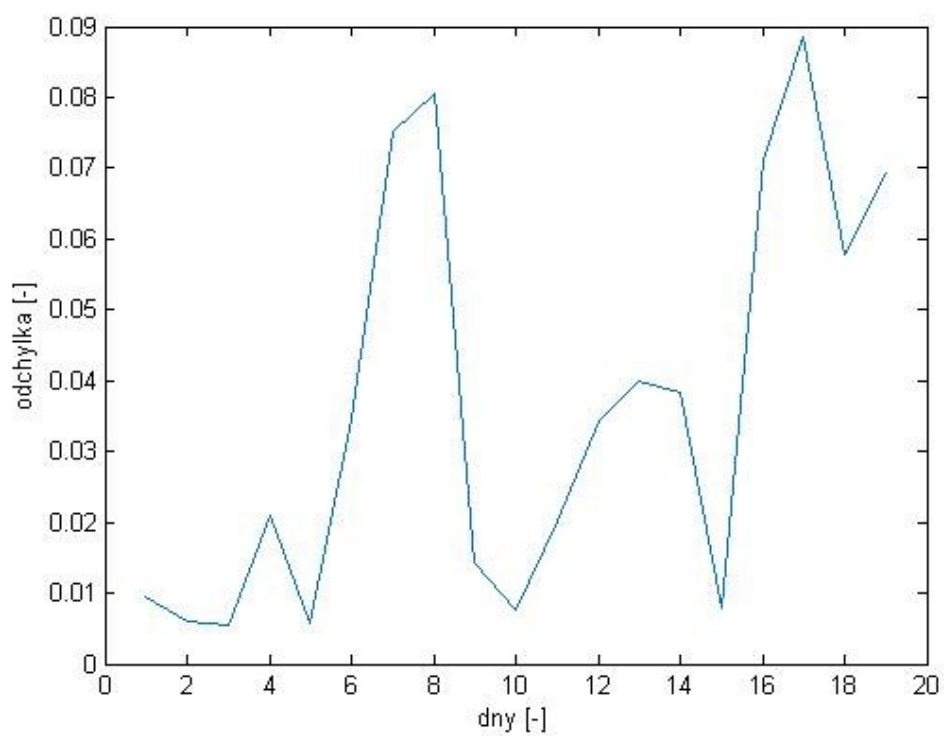
Obrázek 5.39: Histogram všech dnů



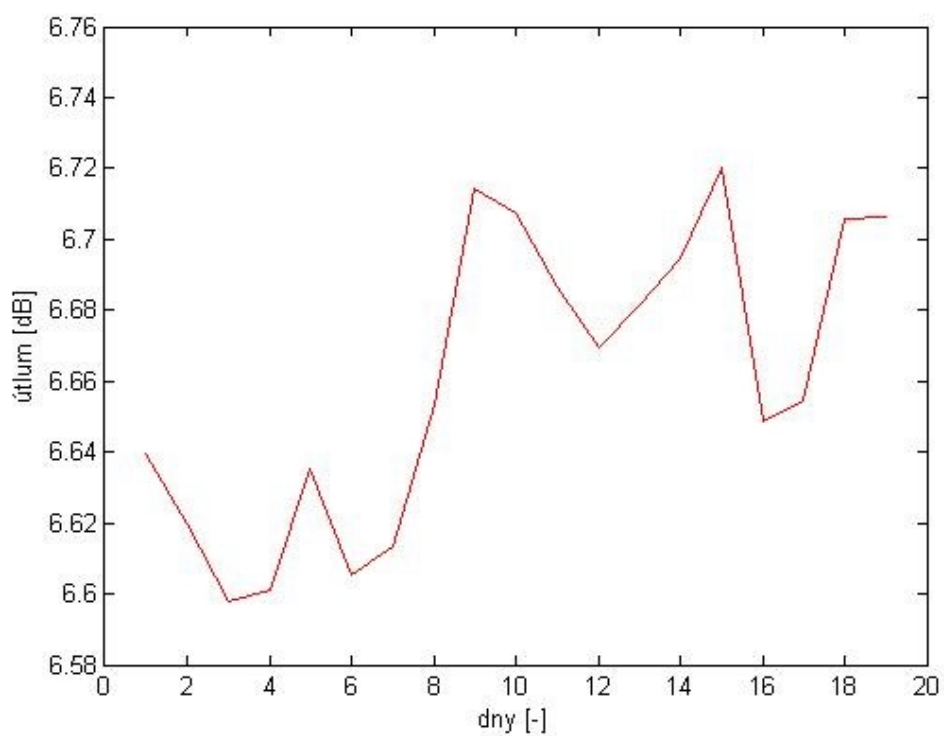
Obrázek 5.40: Vstupní výkon P1



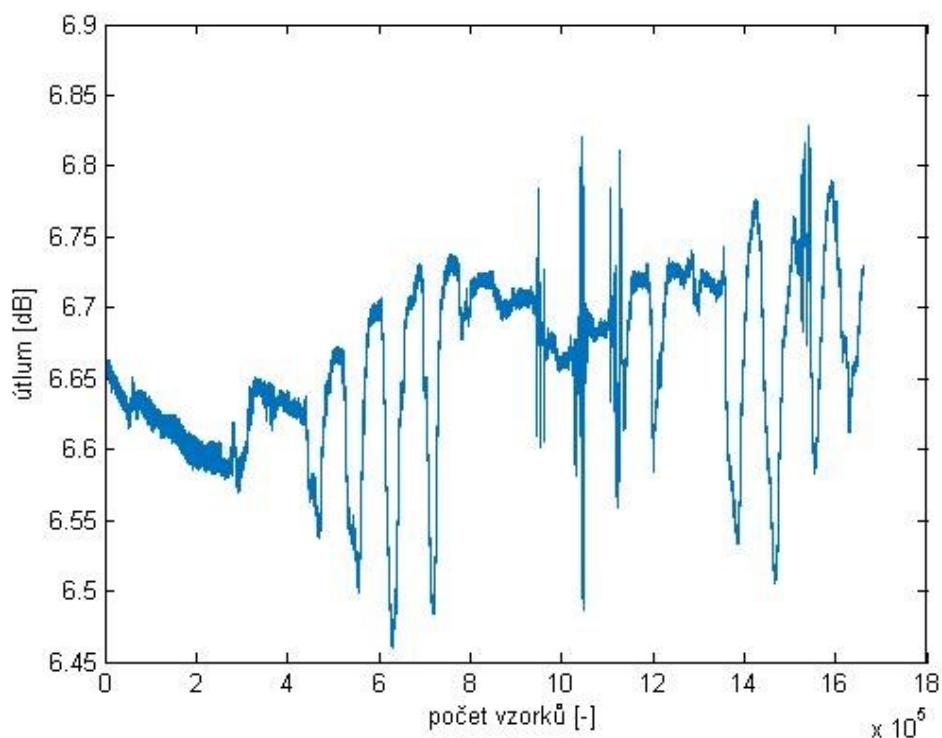
Obrázek 5.41: Výstupní výkon P2



Obrázek 5.42: Směrodatná odchylka



Obrázek 5.43: Střední hodnota



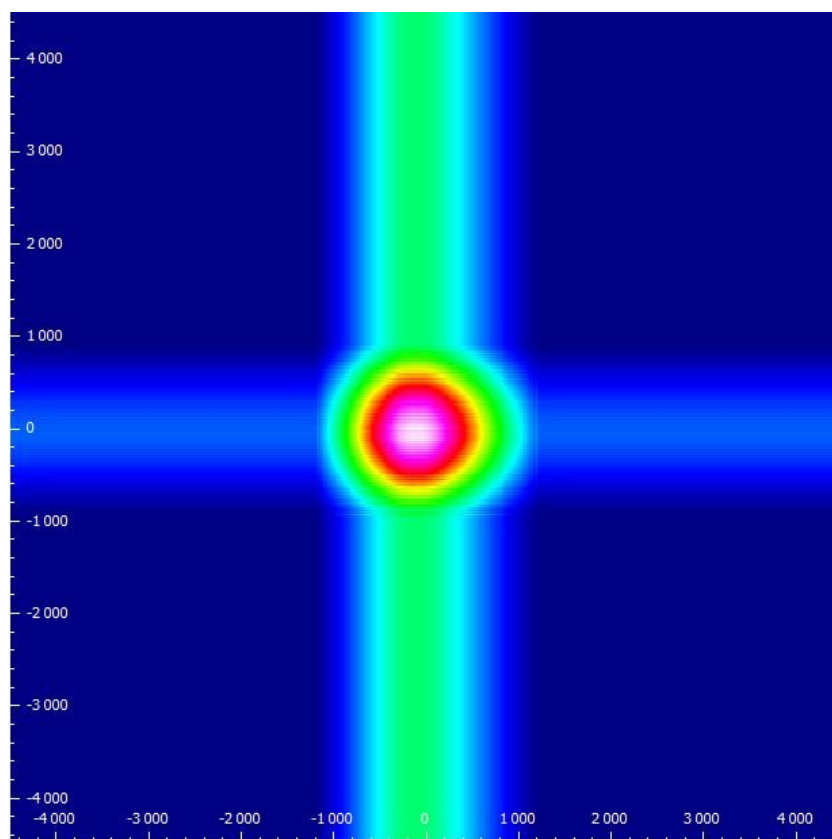
Obrázek 5.44: Celkový útlum

U předchozích grafů lze vidět, že útlum na trase se každým dnem neustále mění z důvodu změny teploty v laboratoři. Z celkového grafu útlumu na obrázku 5.44 však lze vidět, že se během celé měřené doby útlum pomalu zvyšuje. Minimální hodnota útlumu na trase byla 6,46 dB a maximální hodnota 6,84 dB.

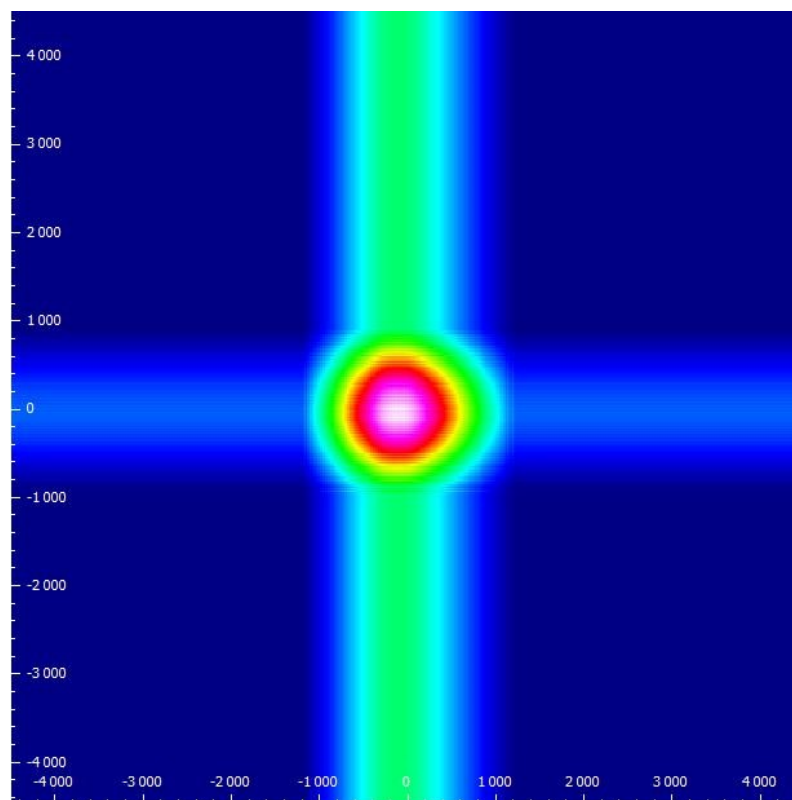
U grafu směrodatné odchylky na obrázku 5.42 lze vidět, že se odchylka neustále mění. Když se však podíváme pozorně na minimální i maximální odchylku, můžeme vidět, že se časem zvyšuje. Tím by se dalo předpokládat stárnutí optického vlákna v čase pomocí laserového záření o vysokém výkonu. Abychom toto potvrdili, museli bychom zatěžovat vlákno delší dobu a sledovat jak se mění odchylka dále.

6 Měření profilu svazku

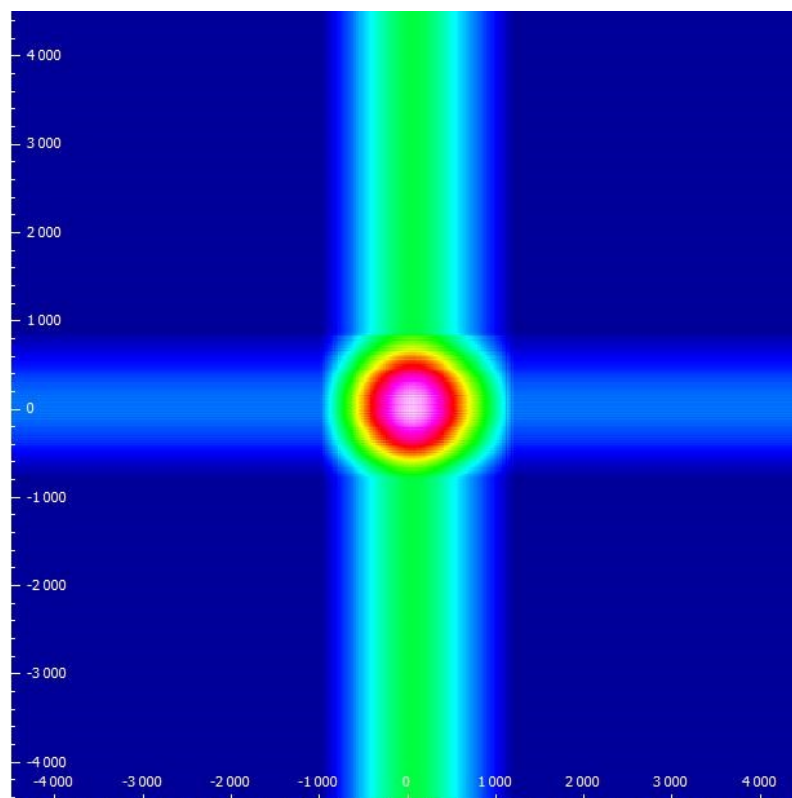
Měření profilu svazku optických vláken probíhalo jako v předchozích případech před zatěžováním i po zatěžování vysokým výkonem z laseru. Byl použit přístroj stavěný přímo pro měření profilů svazku a laserová dioda. Jeden konec měřeného optického vlákna byl zapojen do laserové diody, a z druhé strany připojil do měřicího přístroje. Jako třetí věc bylo potřebné zapojit přístroj do počítače, a pomocí aplikace Thorlabs Beam přístroj nastavit pro měření. Každé měření bylo zopakované 10krát s tím, že vlákno bylo vždy odpojené a následně zapojené do přístroje. To z toho důvodu, aby bylo jisté, že mi program vykresluje stále stejný profil vlákna. Pokud by bylo totiž vlákno špatně zapojeno, nebo by byl posunutý špatně držák u přístroje, mohla by aplikace vykreslit špatné profily svazku, čím by bylo těžké posoudit, jestli se profil svazku před zatížením a po zatížení nějak změnil. Na následujících obrázcích budou znázorněny graficky naměřené profily svazku pro obě vlákna.



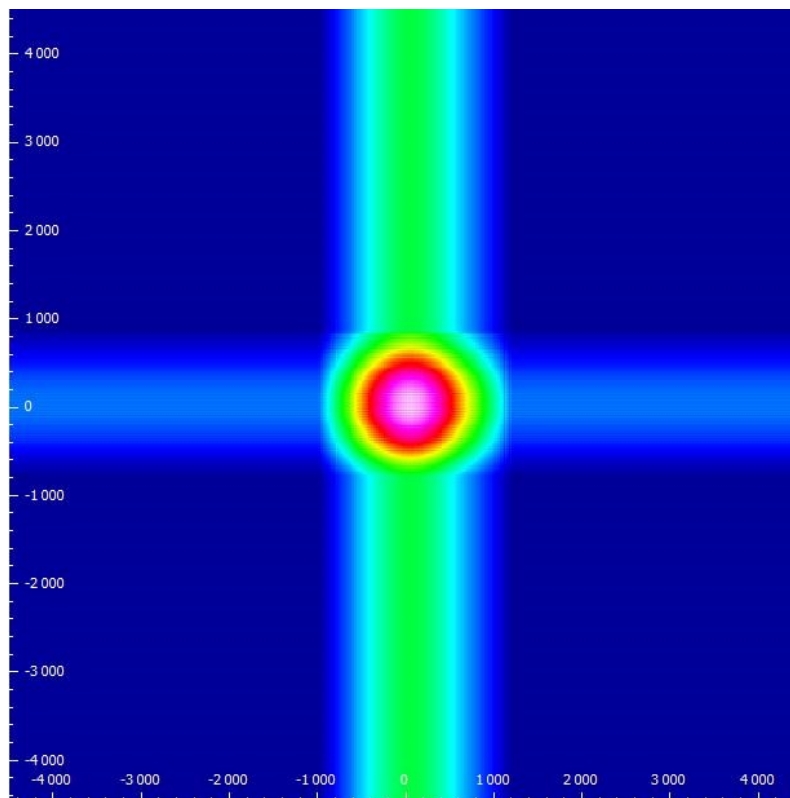
Obrázek 6.1: Profil svazku 20 m vlákna před zatížením



Obrázek 6.2: Profil svazku 20 m vlákna po zatížení



Obrázek 6.3: Profil svazku 20 m vlákna před zatížením



Obrázek 6.4: Profil svazku 20 m vlákna po zatížení

Z obrázků 6.1 až 6.4 můžeme vidět, že se geometrická struktura vlákna po zatížení laserem s maximálním výkonem 320 mW nezměnila. Aby byla tato struktura nějak narušená, museli bychom nejspíš použít silnější výkon laseru a zatěžovat vlákno delší dobu.

Závěr

Cílem této práce bylo zjistit, jestli má vysoce výkonné záření laseru vliv na vlastnosti optického vlákna, a to jak na změnu útlumu, tak na změnu profilu svazku.

První část práce byla zaměřená na teoretické zpracování poznatků o optických vláknech, laserech a optických zesilovačích. Obeznamenali jsme se zde z typy optických vláken, možnými druhy útlumů na nich a nejpoužívanějšími vlákny v telekomunikacích. V kapitole o laserech byla popsána základní konstrukce laseru, podmínky pro jeho funkčnost a použití běžných laserů dnešní doby. V poslední teoretické kapitole jsme se zabývali typy optických zesilovačů a zejména se zaměřili na EDFA zesilovače, které byly použité v praktické části této bakalářské práce.

Druhá část práce byla zaměřená na návrh měřicího pracoviště pro měření stárnutí optických vláken. Zde byla popsána konstrukce použitého vláknového laseru a EDFA zesilovačů. V této části bylo také změřeno spektrum laseru a výkon laseru při různých nastaveních proudů pro LD a zesilovače. Z naměřených hodnot bylo zjištěno, že maximální výkon laseru s oběma zesilovači dosahuje při nastavených proudech 1000 mA na LD a 900 mA na obou zesilovačích hodnotu až 320 mW. Spektrum laseru se pohybovalo v okolí centrální vlnové délky 1560 nm.

V poslední části této bakalářské práce bylo potřebné zjistit, jak se mění vlastnosti vlákna po zatížení vysoce výkonným zářením laseru vzhledem na jejich délku a dobu zatížení. První měření proběhlo pomocí metody vložných ztrát na dvou 20 metrových kusech vlákna. První vlákno bylo zatěžováno 6 hodin a druhé 48 hodin. Z naměřených výsledků však bylo zjištěné, že útlum na trase je po zatížení nižší než útlum před zatížením. To bylo s největší pravděpodobností způsobeno tím, že útlum použitého optického vlákna s délkou 20 metrů je mnohem menší, než útlum, který může vzniknout při různém zapojení konektorů nebo spojek, tedy chybou měření. Proto jsme zhodnotili tento měřicí postup jako špatně zvolenou metodu měření, a pro druhé vlákno byl použit jiný měřicí postup. V tomto postupu byl měřený útlum vlákna v reálném čase po dobu 18 dnů. V této metodě byli připojeni na vstup i výstup měřeného vlákna děliče, jejichž 2% rameno bylo připojeno k detektoru výkonu. Tyto dva 2% výstupy byly použity pro měření v reálném čase. Výsledky se tak ukládaly po dobu 18 dnů do počítače, a na konci zatěžovací doby byli statisticky vyhodnoceny. Především díky zvolené měřicí metodě, bylo možné pozorovat nestabilitu měření na vstupu i výstupu měřeného vlákna. Díky této měřicí metodě se značně klesla chybovost měření. Z výsledků vyplývá, že erbiové vlákno bylo citlivé na změny teploty v místnosti, a tím pádem hodnoty útlumu mírně kolísaly. Z grafu směrodatné odchylky je však vidět, že se minima i maxima s postupem času zvyšují. Tím by se dalo předpokládat, že vlákno pomalu degraduje v čase, takže stárne.

V budoucnosti máme v úmyslu využít metodu měření v reálném čase pro delší dobu zátěže optických vláken. Tím by se dalo definitivně ověřit, jestli vlákna skutečně degradují v čase za pomoci záření laseru o vysokém výkonu.

Použitá literatura

- [1] FILKA, Miloslav. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. Vyd. 1. Brno: M. Filka, 2009. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [2] NEUMANN, Petr. Komunikace pomocí světelného signálu: Optické přenosové soustavy [online]. Zlín, 2013 [cit. 2015-11-27]. Dostupné z: http://www.utb.cz/file/41972_1_1/
- [3] ŠIŠKA, Petr, Stanislav KEPÁK a Jakub ČUBÍK. Skripta Optoelektronika [intranet]. Ostrava, 2015 [cit. 2015-11-28].
- [4] MEYERS, Robert A. Encyclopedia of lasers and optical technology. San Diego: Academic Press, c1991. ISBN 0122266935.
- [5] MYNBAEV, Djafar K a Lowell L SCHEINER. Fiber-optic communications technology. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, c2001. ISBN 0139620699.
- [6] ALWAYN, Vivek. Optical network design and implementation. Indianapolis, IN: Cisco Press, c2004. ISBN 1587051052.
- [7] LÓPEZ-HIGUERA, José Miguel. Handbook of optical fibre sensing technology. New York: Wiley, 2002. ISBN 0471820539.
- [8] VENGHAUS, Herbert a Norbert GROTE. Fibre optic communication: key devices. New York: Springer, c2012. Springer series in optical sciences, v. 161. ISBN 9783642205170.
- [9] LUCKI, Michal. Optické zesilovače [online]. [cit. 2015-12-25]. Dostupné z: http://data.cedupoint.cz/oppa_e-learning/2_KME/162.pdf
- [10] Erbium-doped Gain Media. RP Photonics Encyclopedia [online]. [cit. 2015-12-25]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/erbium_doped_gain_media.html

Seznam příloh

Příloha A: Grafy spektra laseru - umístěna na CD

Příloha B: Fotodokumentace - umístněna na CD

Adresářová struktura přiloženého CD/DVD:

"CD-ROM":\Příloha A\Grafy spektra laseru\

"CD-ROM":\Příloha B\Fotodokumentace\